

LA GRAN EXTINCION A DEBATE

TEORIAS Y DUDAS SOBRE LA NATURALEZA DEL UNIVERSO

TOMOGRAFIA ACUSTICA DE LOS MARES

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

LA MAQUINA DE AJEDREZ

DICIEMBRE 1990
500 PTAS.



Diciembre de 1990 Número 171

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Una máquina ajedrecística con nivel de gran maestro* y *Juegos matemáticos*; Santiago Torres: *Impronta parental de los genes*; Amando García: *El efecto fotorefractivo*; Elisa Villa: *El impacto de un cuerpo extraterrestre* y *Una erupción volcánica*; Manuel Puigcerver: *Tomografía acústica del océano*; Ramón Pascual: *Verdades universales*; José Vilardell: *Hace* y *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Joandomènec Ros, Josep-Enric Llebot y José M. García de la Mora

Ciencia y empresa:

Manuel Puigcerver

Libros:

Laureano Carbonell, Armando Riera, Diego Pavón y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
5	© 1989 Louie Psihoyos/Matrix
6-7	Paul Grange
8-10	Johnny Johnson
12	Cortesía de la Universidad de Carnegie-Mellon
15	Carol Donner
16-20	Patricia J. Wynne
23	Roger S. Cudney, Universidad de California del Sur
24	Paul Grange
25-26	Gabor Kiss
27	R. M. Pierce, R. S. Cudney, G. D. Bacher y J. Feinberg, Univ. California del Sur
28	Gabor Kiss
44-45	Patricia J. Wynne
47-48	George Retseck
49	Johnny Johnson (*arriba*)
50	Alessandro Montanari, Universidad de California, Berkeley (*abajo*)
51	Glen A. Izett, Servicio de Inspección Geológica de los EE.UU.
52	Centro canadiense de detección remota: Departamento de Energía y Recursos Minerales
55	George Retsek (*arriba*), Patricia J. Wynne (*abajo*)
56	Keith Cox, Univ. de Oxford
57	George Retseck
58	G. Retseck y Patricia J. Wynne
59-62	George Retseck
65	P. L. Richardson, Institución Oceanográfica Woods Hole
66-69	Ian Worpole
71-72	Antonio Aragón, Marcos Farina, Henrique Lins de Barros y Darci Motta
73	Marcos Farina, Henrique Lins de Barros y Darci Motta
74	Antonio Aragón, Marcos Farina, Henrique Lins de Barros y Darci Motta
75-78	Marcos Farina, Henrique Lins de Barros y Darci Motta
80-81	Hank Iken
82-83	P. James E. Peebles, Univ. Princeton, y John Horgan
84	Michael Goodman
85	Edward Bell
86	Departamento de Astrofísica, Universidad de Oxford
87	Lennox L. Cowie, Universidad de Hawai
88	Hank Iken
90	Forrest M. Mims III
91-92	Michael Goodman
93	Forrest M. Mims III
94-100	Documents PLS



LA PORTADA evoca la idea de los ordenadores ajedrecísticos. A lo largo de los últimos cuarenta años, estas máquinas se han perfeccionado sin cesar; hoy es rutina verlas doblegar a grandes maestros. El paso siguiente será vencer al campeón del mundo. Los autores de "Una máquina ajedrecística con nivel de gran maestro" confían en que ese día llegue al poco de ultimar su próxima versión de "Pensamiento profundo", el más avanzado sistema ajedrecístico de nuestros días. Prevista para 1992, será mil veces más rápida y capaz de examinar mil millones de posiciones por segundo.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	5500	10.000
Extranjero	6200	11.500

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
08003 Barcelona
Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por T2, Llull, 145 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: "En nuestras defensas antiaéreas, la última novedad es un detector que aprovecha la radiación infrarroja que emiten los motores de los aviones, concentrando esos rayos difusos para convertirlos en una imagen visible en una pantalla asentada en tierra. El telémetro y el calculador de tiro Sperry-Wilson averiguan la altitud, la velocidad y el rumbo de la aeronave enemiga; obedientes a esos datos, las armas disparan."

"La historia registra varios casos de países que promovieron, en pocos años, el desarrollo del alcoholismo. Siempre, la causa radicó en el acceso popular al consumo de licores de alta graduación merced a unos impuestos bajos o inexistentes. Así aconteció en Inglaterra durante el reinado de la reina Ana. A la sazón, Inglaterra estaba en guerra con Francia, y Holanda era su aliada. Por ello se prescindía al máximo de los vinos franceses, en favor de las "holandas", o ginebras, como señal de patriotismo. La consecuencia fue que la embriaguez habitual se convirtió en un estado pavorosamente común."

"Venus –el más visible de los planetas– es, en muchos aspectos, el más decepcionante para los astrónomos. Un visitante incidental a un observatorio, al disfrutar de una vista telescópica diurna del planeta cuando se acerca el momento de su máximo esplendor, es probable que lance una exclamación de deleite ante su luminosidad, su blancura, su fase creciente. Pero un observador experimentado de los planetas contemplará tan monótona visión con ribetes de aburrimiento."

"Con el anuncio de la construcción de una nueva planta de nylón para elevar la producción hasta las 7250 toneladas, Du Pont declara que esa cifra multiplica por cinco la que se contemplaba al autorizarse la primera planta en 1938. Se trata de una bola de nieve que rueda engordando hasta proporciones enormes, y no es aventurado suponer que la situación mundial responde de parte de este impulso. Estados Unidos recibe aproximadamente el 78 por ciento de la producción japonesa de seda. Tomando el consumo del año pasado, que fue de 22.700 toneladas, vemos que el nylón podría cubrir un tercio de nuestras necesidades hacia 1942."

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: "Cualquier médico que se exprese sinceramente no dudará en afirmar que el ejercicio físico puede resultar excesivo y que existen formas imprudentes del mismo que pueden ser perjudiciales. Afirmará también que, en definitiva, hay poca relación entre musculatura y vitalidad, que es la cualidad física suprema. El cultivo de los músculos se hace más por la belleza que, probablemente, por la salud, y como la belleza es en realidad uno de los verdaderos objetivos del esfuerzo, hay que estudiar aquellas formas de ejercicio que ponen el acento en la simetría de la silueta y la gracia de movimientos. El gran embellecedor de la figura y los movimientos es la carrera; con ésta, la musculatura se asienta en su lugar, los hombros retroceden, los lomos mantienen el tórax bien equilibrado y los pies adquieren su posición correcta."

"Muchos incluyen el relámpago globular entre las ilusiones ópticas, debida ésta a la cortísima duración de la descarga disruptiva, lo mismo que, cuando por un instante miramos al Sol de mediodía y apartamos la mirada enseguida, vemos un globo rojizo de fuego cual si flotara suavemente ante nuestros ojos. Esta explicación sería irrebatible de no ser porque tan siniestras esferas parecen acabar sus ominosas danzas con un estallido ensordecedor. ¿No habrá ningún fotógrafo aficionado que intente al menos captar una descarga globular mientras se pasee por el paisaje?"

"Un aeronauta y un astrónomo parisienses, los señores Besançon y Hermite, proponen alcanzar el Polo Norte en un globo que, hinchado, medirá 15 metros con un diámetro de 7,5 metros. El vehículo estará reforzado con armaduras de acero hasta el punto de ser completamente rígido. Tiene una anchura de tres metros por cinco de longitud y contendrá, además de los dos exploradores, ocho perros esquimales, un trineo, una canoa insumergible, provisiones y agua tratada químicamente para que no se congele."

Una máquina ajedrecística con nivel de gran maestro

A lo largo de los últimos 40 años, las máquinas ajedrecísticas empezaron por vencer a noveles, a maestros después y a grandes maestros ahora. ¿Será Gary Kasparov el próximo en caer?

Feng-hsiung Hsu, Thomas Anantharaman, Murray Campbell y Andreas Nowatzyk

En enero de 1988, en una conferencia de prensa celebrada en París, se le preguntó al campeón del mundo, Gary Kasparov, si estaría al alcance de un ordenador vencer a un gran maestro antes del año 2000. "Ni hablar", replicó. "Y si cualquier gran maestro tiene dificultades frente a alguno, tendré mucho gusto en asesorarle."

A los diez meses de hacer Kasparov estas declaraciones, uno de los aspirantes al título mundial, el gran maestro Bent Larsen, era vencido en un torneo de primera categoría celebrado en Long Beach (California) por una máquina ajedrecística que nosotros habíamos diseñado siendo doctorandos de la Universidad Carnegie-Mellon. La máquina, una combinación de circuitos conocidos y nuevos programas a la que bautizamos "Pensamiento profundo" ("Deep Tought"), venció en otras cinco partidas, hizo tablas en una, perdió en otra y quedó empatada con el gran maestro Anthony Miles en el primer puesto de la clasificación. Reglamentariamente, las máquinas no pueden ganar premios monetarios en los torneos, y Miles se embolsó los 10.000 dólares de dotación del primero. (No obstante, un año más tarde, "Pensamiento profundo" venció a Miles en partida amistosa de desempate.)

FENG-HSIUNG HSU, THOMAS ANANTHARAMAN, MURRAY CAMPBELL y ANDREAS NOWATZYK construyeron Pensamiento profundo, la máquina ajedrecística más avanzada del mundo, mientras realizaban sus tesis doctorales en diversos campos de las ciencias de cómputo, en la Universidad Carnegie-Mellon. Desde entonces, Hsu, Anantharaman y Campbell han ingresado en el Centro de Investigación Thomas J. Watson, de IBM; Nowatzyk está en Sun Microsystems. Fue Hsu quien comenzó el proyecto, trabajó en él con plena dedicación y actuó de arquitecto del sistema. Se graduó en ingeniería eléctrica por la Universidad Nacional de Taiwan. Anantharaman preparó casi toda la programación más novedosa y dio forma a diversos algoritmos. Se graduó en ingeniería eléctrica por la Universidad Hindú de Banarés, en la India. Campbell se encargó de la puesta a punto y mantenimiento del libro de aperturas y preparó los programas de precomputación para la función de evaluación; se formó en la Universidad de Alberta. Nowatzyk diseñó y llevó a la práctica el ajuste automático de la función de evaluación. Posee diplomas en física e informática de la Universidad de Hamburgo.

En el verano de 1990 (para entonces, tres de los miembros del grupo inicial habían ingresado en IBM), "Pensamiento profundo" había logrado un tanteo del 50 por ciento en 10 partidas jugadas contra grandes maestros en condiciones de torneo, y un tanteo del 86 por ciento en 14 enfrentamientos con maestros internacionales. Algunas de estas partidas, y docenas de otras más contra adversarios menos distinguidos, se jugaron bajo los auspicios de la Federación Estadounidense de Ajedrez, la cual se valió de los resultados para asignar a "Pensamiento profundo" una graduación de 2552, esto es, una capacidad de juego situada en la mitad inferior de la categoría de grandes maestros. El nivel medio de los participantes en torneos, en cambio, se sitúa en torno a 1500 [*véase la figura 2*]. En las partidas jugadas después de agosto de 1988, fecha en que el ordenador alcanzó su velocidad de análisis actual −750.000 posiciones por segundo−, su graduación rebasaba los 2600 puntos.

La próxima generación de la máquina, que esperamos esté lista para jugar en el año 1992, operará con equipos y dispositivos mucho más potentes. El sistema multiplicará más de 1000 veces su capacidad de análisis, situándola en torno a los 1000 millones de posiciones por segundo. Es muy posible que este nuevo avance convierta a la descendiente de "Pensamiento profundo" en un ajedrecista más potente incluso que Kasparov, o que cualquier otro ser humano presente o pasado.

¿A qué se debe este interés por enseñar a una máquina a acorralar a un rey de madera en un tablero escaqueado? Ante todo, el ajedrez ha sido tenido en Occidente como paradigma de los juegos de inteligencia, y por tanto −son palabras de Goethe− como "piedra de toque del intelecto". Son muchos quienes aducen que una máquina ajedrecística que tuviera éxito pleno demostraría la posibilidad de modelizar el pensamiento o, al contrario, que no hay pensamiento en el ajedrez. No cabe duda de que cualquiera de estas conclusiones modificaría radicalmente la concepción de lo que se suele entender por inteligencia.

Y lo que es más, la computerización del ajedrez plantea un problema ingenieril muy atractivo, puesto ya sobre el tapete hace 40 años en las páginas de *Scientific American* por Claude E. Shannon, fundador de la teoría de la información:

1. GARY KASPAROV, campeón del mundo, posa frente a un ordenador IBM PS/2 utilizado para comunicarse con "Pensamiento profundo", momentos antes de comenzar un torneo contra la máquina, a finales de 1989. Gary Kasparov venció, a pesar de haber alcanzado "Pensamiento profundo" el grado de "gran maestro".

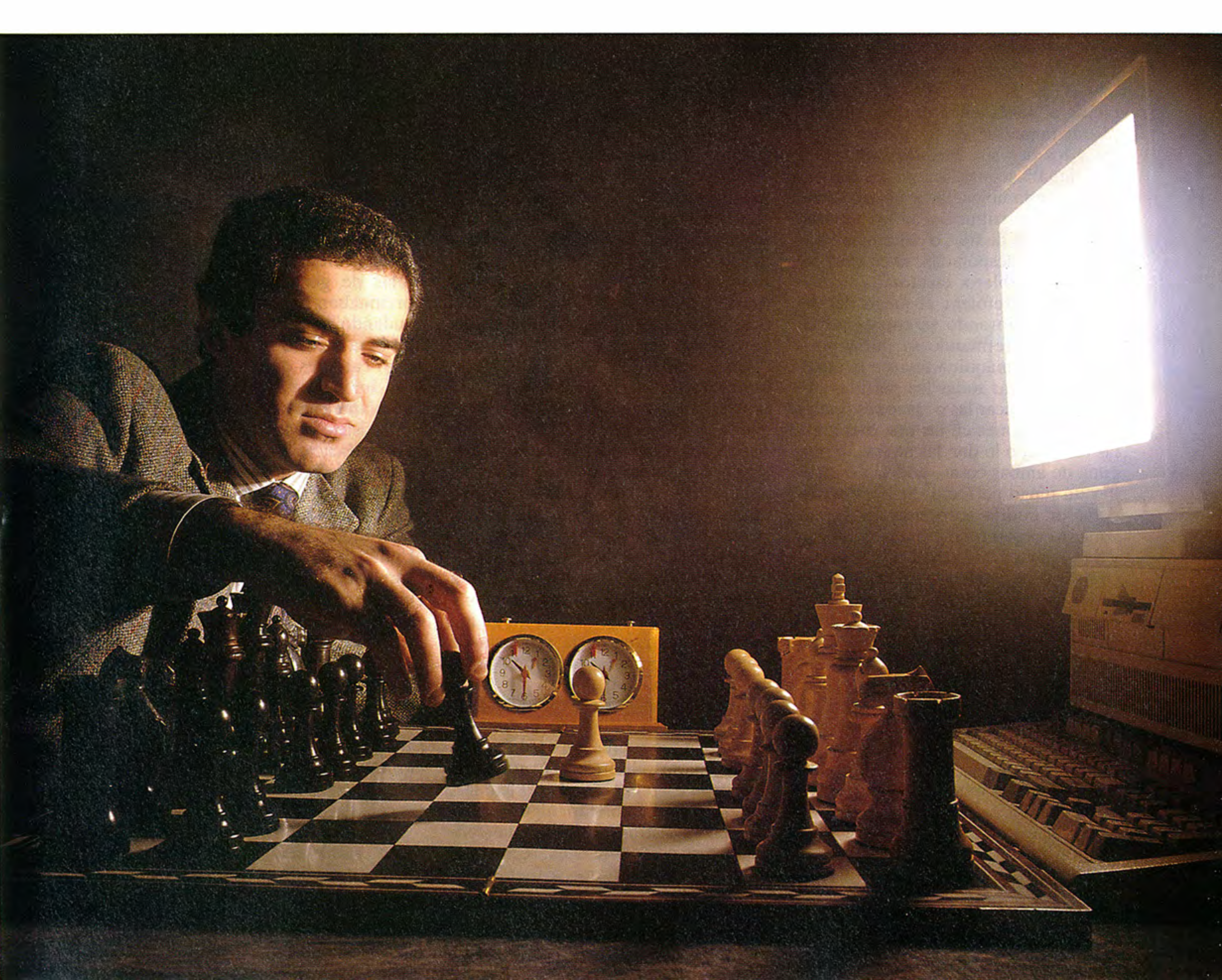
"La investigación del problema de una máquina ajedrecística tiene el propósito de desarrollar técnicas aptas para aplicaciones más prácticas. La máquina ajedrecística resulta ideal para empezar, por varias razones. El problema está nítidamente definido, tanto en lo atinente a las operaciones lícitas (los movimientos de las piezas), como en su objetivo final (el jaque mate). No es tan sencillo que resulte trivial, ni tan superlativamente difícil que sea imposible lograr una solución satisfactoria; tal máquina podría enfrentarse a adversarios humanos, lo que proporcionaría una medida clara de la capacidad de la máquina para este tipo de razonamientos."

Es probable que la consecuencia práctica más importante de los programas ajedrecísticos estribe en haber demostrado la eficacia del análisis por ordenador. El perfeccionamiento de técnicas afines promete progresos en el diseño de redes, la modelización química y el análisis lingüístico.

La idea de una máquina ajedrecística se remonta al decenio de 1760, época en que el barón Wolfgang von Kempelen exhibió por Europa el Autómata Ajedrecístico Maezal. La máquina, que fue apodada "el Turco" porque efectuaba sus jugadas mediante una marioneta con mostacho tocada con turbante, funcionaba, en apariencia, a resultas de un intrincado mecanismo instalado en un armario situado debajo. Su juego era francamente bueno; en una ocasión encolerizó a Napoleón Bonaparte, pues le venció en 19 jugadas. Edgar Allan Poe, entre otros, adivinaría más tarde el secreto del autómata (un diminuto gran maestro que hacía sus jugadas desde un compartimiento secreto), aunque aportando una razón errónea, a saber, que los ocasionales fallos del Turco eran incompatibles con la perfección de una verdadera máquina.

Entre los primeros en examinar el problema de un ordenador capaz de jugar al ajedrez se contó Alan M. Turing, matemático, criptógrafo y científico informático inglés. De todas formas, le resultaba más fácil hacer funcionar su sencillo programa de generación de jugadas y evaluación de posiciones a mano que a máquina. Tentativas similares tuvieron lugar en Alemania, debidas a Konrad Zuse y a otros investigadores. Pero el trabajo germinal fue realizado por Shannon, basándose en los descubrimientos de John von Neumann y Oskar Morgenstern, quienes, en su teoría general de juegos, habían ideado el llamado "algoritmo minimax", merced al cual es posible calcular la jugada óptima.

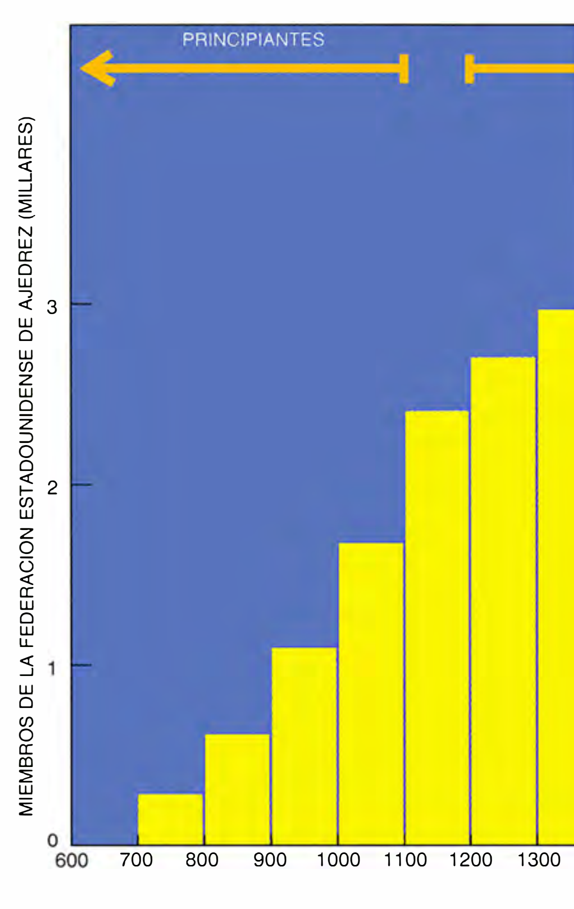
En esencia, el proceso consiste en representar un número arbitrariamente grande de las posiciones que podrían resultar de cada posible serie de jugadas, asignarles una puntuación numérica y retrogradar luego a partir de esta información para deducir la jugada óptima en cada posición. Comienza cuando un generador de movimientos calcula la totalidad de las



jugadas que la computadora podría efectuar desde la posición en que se encuentre la partida, todas las posibles respuestas del adversario, y así sucesivamente. Cada uno de los pasos a lo largo de la serie de acontecimientos es lo que en ajedrez se llama "una semijugada" y "pliegue" o "estrato" en la jerga de las ciencias de la computación.

Cada vez que se profundiza un estrato más en el árbol de análisis del juego, el número de movimientos posibles se multiplica unas 38 veces (que es el número medio de jugadas lícitas posibles desde una posición típica), factor que se reduce a unas 6 si se utiliza la llamada "podadura alfa-beta". Consiguientemente, la mayor parte de las posiciones residen en los brotes más externos del árbol, a partir de los cuales éste va creciendo hasta agotar sea la partida, sea el tiempo concedido. Una función de evaluación va puntuando entonces cada una de las posiciones terminales, asignándole (pongamos por caso) un "1" si corresponde a mate del contrario, un "−1" si somos nosotros quienes sufrimos el mate, y "0" si hay tablas. También es posible graduar matices más finos. El ordenador puede, por ejemplo, tener en cuenta el distinto "valor material" de las piezas mayores y los peones, o estimar el "valor posicional" según parámetros que representan la ubicación y apoyo de las piezas, la distribución de los peones, la ocupación de filas o columnas completamente despejadas, el control del centro del tablero, etcétera.

Se puede reforzar el juego del ordenador mejorando su capacidad de búsqueda o refinando su juicio posicional. Si la máquina tuviese la facultad de generar todas las partidas posibles y clasificar las posiciones finales como posiciones en las que dan mate las blancas, o lo dan las negras, o ninguna de ambas cosas, podría desarrollar un juego perfecto. Semejante ordenador podría sorprender a su adversario declarando "Blancas juegan y dan mate en 137 jugadas"; o, por el contrario, entregando ahora mismo su posición por desesperada. Los análisis exhaustivos de este tipo resultan fáciles en juegos como el "tres en raya", pero no son prácticos en ajedrez, donde existen unas 10^{120} partidas distintas. Se podría conseguir un juego igualmente perfecto profundizando sólo hasta un estrato, con tal de que la evaluación posicional fuese tan perfecta como la que humorísticamente declaraba poseer Richard Réti, maestro famoso en los años veinte, quien afirmaba que sólo veía a una jugada de distancia: la mejor.



2. CAPACIDAD AJEDRECISTICA en ascenso de los ordenadores, ofrecida en esta superposición de los niveles de los 35.000 miembros de la Federación Estadounidense de Ajedrez y los alcanzados por las máquinas en distintas profundidades de análisis (*línea verde*). Los ordenadores ganan unos 200 puntos por cada semijugada, o estrato, que examinan. "Pensamiento profundo" analiza 10 estratos y alcanza el nivel 2600. Su sucesor podrá analizar 14 o 15 estratos.

Los primeros programadores de ajedrez distaban mucho de tener tales pretensiones, pues ni siquiera supieron programar máquinas que respetasen las reglas de juego antes de 1958. Hubieron de transcurrir otros 8 años hasta el advenimiento de MacHack-6, un programa escrito por Richard D. Greenblatt, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, que se convirtió en el primer ordenador que alcanzó el nivel medio de los jugadores de torneo.

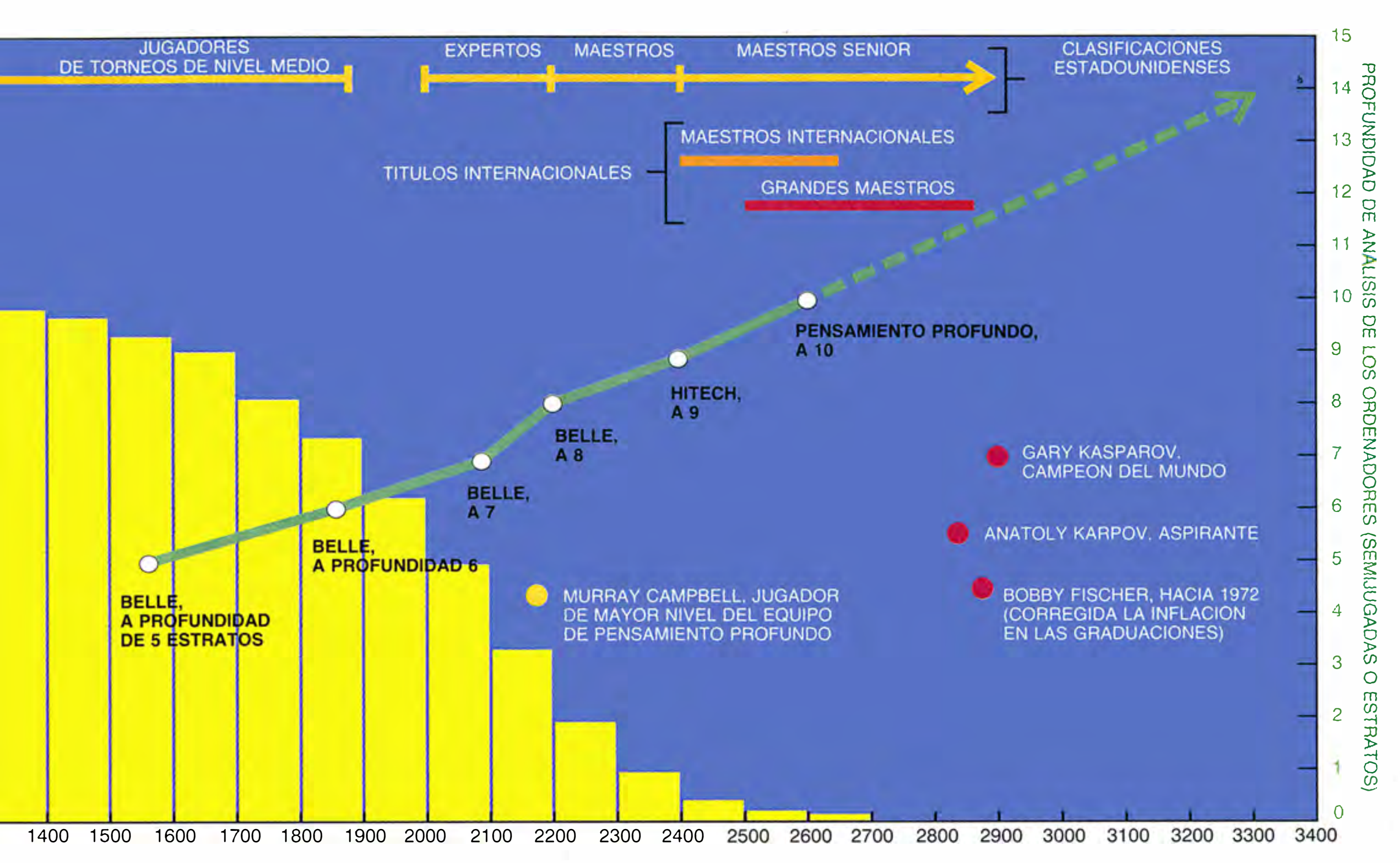
Al aumentar el número de personas que desarrollaban programas ajedrecísticos, se produjo una escisión en dos bandos, a los que denominaremos "de emulación" e "ingenieril". Afirmaba el primero que una máquina ajedrecística debería jugar al estilo de los humanos, posiblemente mediante razonamientos explícitos conducentes a la determinación de las jugadas. El segundo adoptaba una concepción menos restrictiva, aduciendo que lo adecuado a los humanos puede no ser aplicable a los ordenadores. En los primeros tiempos, cuando el ajedrez por ordenador era cuestión mucho más teórica que práctica, fue el bando de emulación el que llevó la voz cantante.

En la década de los años setenta, fue el bando ingenieril quien pasó al centro del escenario, al observarse que la graduación de calidad ajedrecística del programa guardaba correlación casi lineal con la profundidad de examen. Cada estrato adicional inspeccionado aportaba unos 200 puntos a la potencia de juego del ordenador [*véase la figura 2*]. Los programadores lucharon por acceder a ordenadores cada vez más rápidos y hallaron trucos ingenieriles mediante los cuales extraer de la potencia de cómputo disponible exploraciones a mayor profundidad.

Pero la gestión de exploración no es más que la mitad de la batalla. Cuando la programación ajedrecística estaba en sus albores, las rutinas de búsqueda iban generando posiciones, casi sin discernimiento alguno. Las variantes por transposición, que conducen a posiciones iguales, recibían el mismo tratamiento que si fueran distintas. Hoy se evita este doble e innecesario recuento llevando control de las posiciones mediante tablas de generación aleatoria, que se conservan en la memoria de la máquina. Las tablas de generación aleatoria proporcionaban beneficios aún mayores, ayudando al algoritmo de podadura alfa-beta a eliminar muchas líneas de juego carentes de interés.

El mayor de todos los problemas que plantea la exploración de un árbol consiste en saber dónde cercenar sus ramificaciones. No es posible examinar indefinidamente todas las líneas, pero sí sería deseable no cortar el análisis en posiciones inestables. Se crean situaciones de esta clase cuando el análisis se detiene a mitad de un cambio de piezas. Supongamos, por ejemplo, que el ordenador examinase exactamente ocho estratos en todas las líneas y que descubriera una posición a profundidad ocho en la que, al parecer, gana un caballo a cambio de un peón. Aunque la respuesta del contrario le permitiera recuperar el caballo y sacar un peón de ventaja, el ordenador se empeñaría tercamente en llevar la partida hacia la ilusoria ventaja de material.

Este efecto, llamado efecto horizonte, puede ser responsable de que los ordenadores cometan una peculiar



forma de suicidio ajedrecístico no observable ni en los más flojos jugadores humanos. Repentinamente, y sin razón aparente para el observador desprevenido, la máquina empieza a lanzar sus piezas y peones, haciendo añicos su posición. Para reducir la posibilidad de tales errores, los programas añaden ahora una etapa de búsqueda quiescente a la exploración básica. Lo típico es que tales búsquedas examinen sólo secuencias de capturas de piezas o peones hasta llegar a una posición estable, "quiescente", apropiada para la evaluación estática.

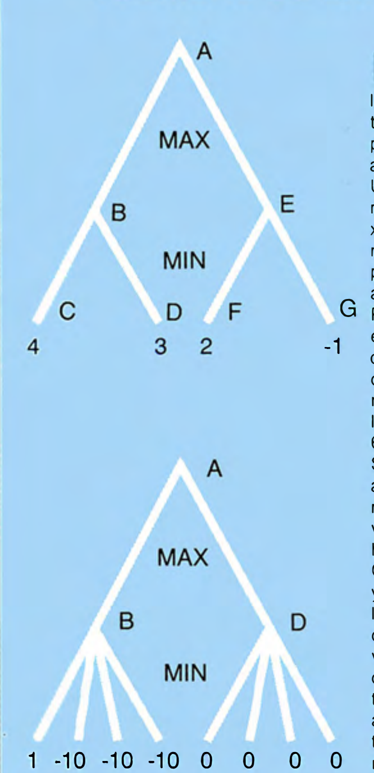
La década de los setenta y la primera mitad de los ochenta presenciaron la prevalencia de las llamadas "máquinas de fuerza bruta", que debían su potencia a una refinada puesta en práctica de las estrategias básicas de búsqueda y de quiescencia. Tal período estuvo casi ininterrumpidamente dominado por el programa Chess 4.0 de la Universidad del Noroeste y sus descendientes 4.X. Este programa fue saltando de una a otra generación de ordenadores, mejorando sistemáticamente su graduación ajedrecística, hasta rebasar el nivel de experto (2000) en 1979.

También se iniciaron en los años setenta varios intentos de construcción de máquinas ajedrecísticas especializadas. La más famosa, Belle, de los laboratorios AT&T Bell, traspasó la barrera de maestro nacional (2200) en 1983. La era de las máquinas de fuerza bruta alcanzó su máximo esplendor hacia 1986, con el ascenso de Cray Blitz, que funcionaba en los supercomputadores Cray, y de Hitech, una máquina especializada que generaba jugadas en 64 microcircuitos, uno por escaque del tablero. Hitech ganó el Campeonato Norteamericano de Ajedrez Computerizado en 1985, y Cray Blitz, el mundial de ajedrez computerizado en 1986, tras desempatar con Hitech en la última ronda. Cray Blitz e Hitech examinaban 100.000 y 120.000 posiciones por segundo, respectivamente.

El historial de "Pensamiento profundo" es bastante insólito. Para empezar, fue desarrollado por un equipo de estudiantes de doctorado, sin patrocinio oficial de la universidad ni supervisión directa del profesorado. (Los profesores que estaban, a la sazón, dirigiendo trabajos sobre ajedrez computerizado no tenían conexión con el equipo de "Pensamiento profundo".) En segundo lugar, los componentes del grupo poseían una preparación heterogénea, lo que les condujo a adoptar métodos heterodoxos.

En junio de 1985, uno de los autores (Hsu) llegó a la conclusión de que resultaría posible construir un generador de jugadas con un solo microcircuito utilizando la tecnología de integración a muy gran escala (VLSI), facilitada a la comunidad académica por la Agencia de Programas Avanzados para la Defensa (APAD). Aunque Hsu basó su microcircuito en el generador de jugadas de Belle, descubrió varios refinamientos que hicieron su diseño susceptible de integración a muy gran escala. Asimismo, diseñó su microcircuito de modo tal que sus rasgos electrónicos (contaba con 35.925 transistores) pudieran empaquetarse bien, a pesar de que el tamaño mínimo del rasgo ofrecido por MOSIS, la compañía fabricante de microcircuitos financiada por APAD, era relativamente burdo (tres micrometros). Hsu invirtió seis meses trabajando en el diseño, simulación y organización de su circuito; hubo luego de esperar otros cuatro para recibir las primeras unidades operativas. Ensayó el microcircuito conectándolo a una estación de trabajo científica, y averiguó que tenía capacidad para procesar hasta dos millones de jugadas por segundo, una velocidad 10 veces mayor que la matriz de 64 microcircuitos en que se fundaba Hitech.

TECNICAS DE EXPLORACION DE ARBOLES



Para determinar la primera jugada óptima, el programa ajedrecístico genera un árbol de variaciones, evalúa las posiciones finales y retrograda desde ellas. Las puntuaciones asignadas a las posiciones se hacen desde el punto de vista del programa; por tanto, las puntuaciones altas son ventajosas.

Una técnica sencilla, llamada algoritmo minimax, espiga las mejores variantes buscando las que dan puntuaciones máximas para las jugadas del ordenador y puntuaciones mínimas para las respuestas del adversario. En el árbol de la parte superior, los nodos B y E se han minimizado a 3 y a −1, respectivamente, y el nodo A está maximizado a 3. Para que este sencillo procedimiento pueda profundizar un estrato más es preciso multiplicar por 38 la potencia de cómputo (que es el número de posibles jugadas que parten de una posición ajedrecística típica). La podadura alfa-beta refina el algoritmo, permitiendo que el programa desprecie líneas de juego sin interés, por lo que basta multiplicar por 6 la velocidad de cómputo para analizar un estrato más. Suponiendo, por ejemplo, que la asignación de tanteos arranque del nodo C y avance hacia la derecha, el ordenador asignaría a B un valor de 3, y seguidamente observaría que E es menor o igual que 2. Por consiguiente, no hay necesidad de examinar F.

Otro método, denominado "extensión singular", saca mayor partido de la exploración del ordenador centrándose en las posiciones críticas. En el árbol inferior, el valor de B depende fuertemente del que posee C, mientras que el valor de D no depende para nada del que porten ninguno de sus sucesores. Para aumentar la fiabilidad de la puntuación de A, el algoritmo de extensión singular procedería a examinar C hasta un estrato más de lo normal. Este método permite a Pensamiento profundo ver extraordinariamente lejos en muchas situaciones de complejidad táctica.

En este punto, Hsu unió sus fuerzas a las de Thomas Anantharaman, a la sazón estudiante de informática de segundo ciclo integrado en el grupo de estudio del reconocimiento del habla. Anantharaman había preparado un programa ajedrecístico "de juguete", que generaba jugadas gracias a una batería de programas. Al reemplazar su batería de programas por el microcircuito de Hsu, Anantharaman aceleró el análisis del programa en un 500 por ciento, hasta un total de 50.000 posiciones por segundo.

Hsu y Anantharaman se tornaron ambiciosos y, un poco por diversión, decidieron preparar su máquina para el Campeonato Norteamericano de Ajedrez Computerizado, para el que sólo faltaban siete semanas. El proyecto reclutó otros dos posgraduados en informática: Murray Campbell y Andreas Nowatzyk. Resultaba deseable una función de evaluación más refinada, y Campbell, que había competido en torneos de ajedrez, se avino a trabajar en ella. La segunda tarea, más difícil todavía, dada la escasez de tiempo, era la de conceder mayor potencia al probador de microcircuitos para que actuara a modo de ingenio explorador. Tal ingenio habría de sacar mayor partido de la velocidad del microcircuito generador de jugadas de lo que el enlace a través de la estación de trabajo podía conseguir.

Hsu emprendió acciones drásticas para tener a tiempo dicho componente: decidió que el ingenio prescindiera de dos aspectos fundamentales en ajedrez: los enroques del rey y la repetición de posiciones. (Cualquier jugador tiene derecho a exigir tablas si demuestra que una posición se ha repetido tres veces, siendo las tres en el turno del mismo jugador.) Para compensar estas omisiones, se adoptó una estrategia de búsqueda híbrida, consistente en que la exploración de los primeros estratos se efectuase en un ordenador huésped que sí tenía en cuenta el enroque y la repetición de posiciones. Los estratos más profundos (responsables, obviamente, de la mayoría de las posiciones) eran analizados en el ingenio.

Como no disponíamos de presupuesto para nuestro proyecto, creamos nuestra primera máquina, ChipTest, echando mano de piezas de otros. El valor de todos los componentes no iría más allá de los 500 o 1000 dólares, si se suma el valor unitario estimado de los microcircuitos pagados por APAD. Pero ni el ingenio ni la programación del ordenador huésped pudieron quedar perfectamente depurados de errores a tiempo para el campeonato, y la máquina, defectuosa, sólo consiguió obtener un tanteo mediano. De todos modos, no era mal resultado para sólo siete semanas de trabajo.

Fue mucho lo que aprendimos en aquel debut. Hsu observó, por ejemplo, que otros dos programas habían jugado en líneas en las cuales cada una de sus jugadas podía ser obligada y en las que ninguno de los bandos sabía el resultado de antemano. Dicho de otro modo, el programa que salió con ventaja la debió a pura chiripa. Hsu propuso remediar este defecto con lo que dio en llamar "algoritmo de extensión singular". El algoritmo investiga más profundamente, esto es, extiende la búsqueda a profundidades mayores, en las líneas donde el ordenador solamente ve una respuesta buena, con el propósito de garantizar que las posiciones delicadas reciban una atención cuidadosa.

Cuando uno de los bandos se encuentra a punto de ganar —por ejemplo— un alfil acorralado, lo normal es que el defensor disponga cada vez de menos respuestas buenas cuanto más profunda es la búsqueda. Cerca del final ya no hay más que una respuesta válida, tras la cual se pierde el alfil. La extensión singular centra su atención en tales casos. En una de las partidas, hizo posible que el ordenador dejase atónito a un maestro, anunciándole mate en 19 jugadas.

Anantharaman, que era el único que comprendía la codificación del programa que había escrito para el ordenador huésped del ChipTest, programó él solo el algoritmo de extensión singular. Entretanto, Hsu remató la microcodificación, el conjunto de instrucciones encargadas de controlar al equipo físico de la máquina en su nivel más elemental. Con su capacidad para examinar entre 400.000 y 500.000 posiciones por segundo, ChipTest ganó limpiamente el Campeonato Norteamericano de Ajedrez Computerizado de 1987, derrotando, entre otras, a la máquina campeona del mundo, Cray Blitz. Así acabó el reinado de la fuerza bruta pura. En nuestros días, casi todos los programas punteros dan cabida a elementos de exploración selectiva.

Nuestro trabajo había mostrado claramente que el equipo material de ChipTest podría acelerarse aún más, y que la exploración era susceptible de una gestión más inteligente. Los 5000 dólares inicialmente necesarios para esta empresa —llamado proyecto "Pensamiento profundo"— nos fueron facilitados por el director de tesis de Hsu, H. T. Kung.

La versión básica de la máquina ajedrecística "Pensamiento profundo" consta de unos 250 microcircuitos —entre ellos, dos microprocesadores— alojados en una única placa,

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

cuya dimensión mayor es aproximadamente la mitad de una página de esta revista [*véase la figura 3*]. La máquina está controlada por un programa —la llamada programación huésped— instalado en un ordenador de los conocidos como "estaciones de trabajo". La velocidad bruta de los procesadores de la máquina es apenas algo mayor que la de los montados en ChipTest, pero un control más preciso del algoritmo de exploración ha permitido aumentar su rendimiento en un 30 por ciento.

La sección de evaluación consta en su parte material de cuatro componentes. Una evaluación de las posiciones de las piezas (lo único heredado de ChipTest) asigna tanteos a las piezas atendiendo a su posición más o menos central, a su movilidad

ANATOLY KARPOV SE ENFRENTA A PENSAMIENTO PROFUNDO

UNIVERSIDAD DE HARVARD, FEBRERO DE 1990

Comentarios del Maestro Internacional Michael Valvo

	BLANCAS KARPOV	NEGRAS PENSAMIENTO PROFUNDO
1	e2-e4	c7-c6
2	d2-d4	d7-d5
3	Cb1-d2	g7-g6
4	c2-c3	Af8-g7
5	e4-e5	

Esta jugada señalaba el final del libro de aperturas de Pensamiento profundo.

	...	f7-f6!

¡Jugada fantástica para una máquina! Las negras atacan, sin dudar, la cabeza de la cadena de peones e inducen a las blancas a aflojar su control de los cuadros blancos.

6	f2-f4	Cg8-h6
7	Cg1-f3	enroque
8	Af1-e2	f6×e5!

Pensamiento profundo tropieza con un activo contrataque.

9	f4×e5	c6-c5!

Pues 10 d4×c5 permitiría a las negras una cierta ventaja al continuar con Cf3-g4

10	Cd2-b3	c5×d4
11	c3×d4	Cb8-c6
12	enroque	Dd8-b6
13	Rg1-h1	a7-a5

La falange central de peones blancos todavía le concede cierta ventaja, pero su peón en d4 es francamente débil y sus piezas no cooperan bien ni ocupan cuadros valiosos.

14	a2-a4	Ac8-f5
15	Ac1-g5	Af5-e4
16	Cb3-c5!	

Esta jugada, que amenaza un ataque simultáneo sobre la reina y la torre negras en la jugada siguiente, se inspira, probablemente, en cierto conocimiento del funcionamiento de los ordenadores. Pensamiento profundo no puede resistirse a capturar el peón:

	...	Db6×b2?

Un error; era mejor 16 ... Ch6-f5!, preparando el sacrificio de una torre por un caballo después de 17 Cc5-d7, Db6×b2; 18 Cd7×f8, Cf5×d4!, con lo que el ataque de las negras hubiera sido muy peligroso.

17	Cc5×e4	d5×e4

Pensamiento profundo estima ahora que está en desventaja por el equivalente de un tercio de peón. Terminada la partida, Karpov quedó impresionado por la evaluación del ordenador, que se aproximó mucho a la suya durante la partida.

18	Ta1-b1	Db2-a3

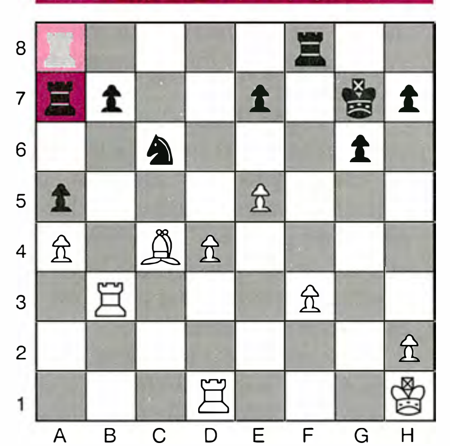
Es forzada, ya que 18 ... Db2-c3 pierde ante 19 Tb1-b3, mientras que 18 ... Db2-a2 lleva a 19 Cf3-d2 seguida de 20 Ae2-c4.

19	Ag5-c1	Da3-c3
20	Ac1-d2	Dc3-a3
21	Ad2-c1	Da3-c3
22	Tb1-b3	Dc3-a1

Karpov repite jugadas para disponer de más tiempo para pensar.

23	Ae2-c4 (jaque)	Rg8-h8
24	Ac1×h6!	Da1×d1
25	Ah6×g7 (jaque)	Rh8×g7
26	Tf1×d1	e4×f3
27	g2×f3	

PENSAMIENTO PROFUNDO



KARPOV

Hubiera sido mejor 27 Tb3×b7. Pero, ¿cómo hubiera podido Karpov adivinar la siguiente jugada de Pensamiento profundo?

	...	Ta8-a7!!

El público se echó a reír ante esta jugada "fea". Sin embargo, según Karpov, era la única oportunidad que le quedaba a Pensamiento Profundo.

28	Ac4-d5	Tf8-d8
29	Tb3-b5	Ta7-a6!

La máquina se está defendiendo muy diestramente. Ahora amenaza con 30 ... Cc6-a7; 31 Ad5×b7, Ca7×b5; 32 Ab7×a6, Td8×d4; equilibrando el juego.

30	Ad5-c4	Ta6-a7
31	Ac4-d5	Ta7-a6
32	Tb5-c5	Td8-dt
33	Rh1-g2	Ta6-b6!
34	Ad5×c6	b7×c6
35	Rg2-f2!	

Arriesgada, en vista de la ligera ventaja que ahora tienen las negras, pero Karpov sigue decidido a ganar.

	...	Td7-d5
36	Tc5×d5	c6×d5
37	Td1-c1	Tb6-b4
38	Rf2-e3	Tb4×a4

Otra forma, posiblemente más sencilla, de conseguir tablas es 38 ... Tb4-b3 (jaque); 39 Re3-e2, Tb3-b4 con repetición de posiciones, ya que las blancas mal pueden permitirse entregar su peón de la columna d.

39	Tc1-c5	e7-e6
40	Tc5-c7 (jaque)	Rg7-g8
41	Tc7-e7	Ta4-a3 (jaque)
42	Re3-f4	Ta3-d3
43	Te7×e6	Td3×d4 (jaque)
44	Rf4-g5	Rg8-f7!

Una espléndida interpolación defensiva.

45	Te6-a6	a5-a4

Pensamiento profundo "cree" que lleva ventaja y por consiguiente se niega a forzar tablas con 45 ... h7-h6 (jaque); 46 Rg5×h6, Td4-h4 (jaque); 47 Rh6-g5, Th4-h5 (jaque); 48 Rg5-f4, Th5-f5 (jaque), seguida de 49 ... Tf5×e5.

46	f3-f4	h7-h6 (jaque)
47	Rg5-g4	Td4-c4?

47 ... g6-g5! daba tablas, pero la máquina, convencida aún de que lleva ventaja, se niega a ceder un peón a cambio de seguridad.

48	h2-h4	Tc4-d4
49	Ta6-f6 (jaque)	Rf7-g7
50	Tf6-a6	Rg7-f7
51	h4-h5	g6×h5?

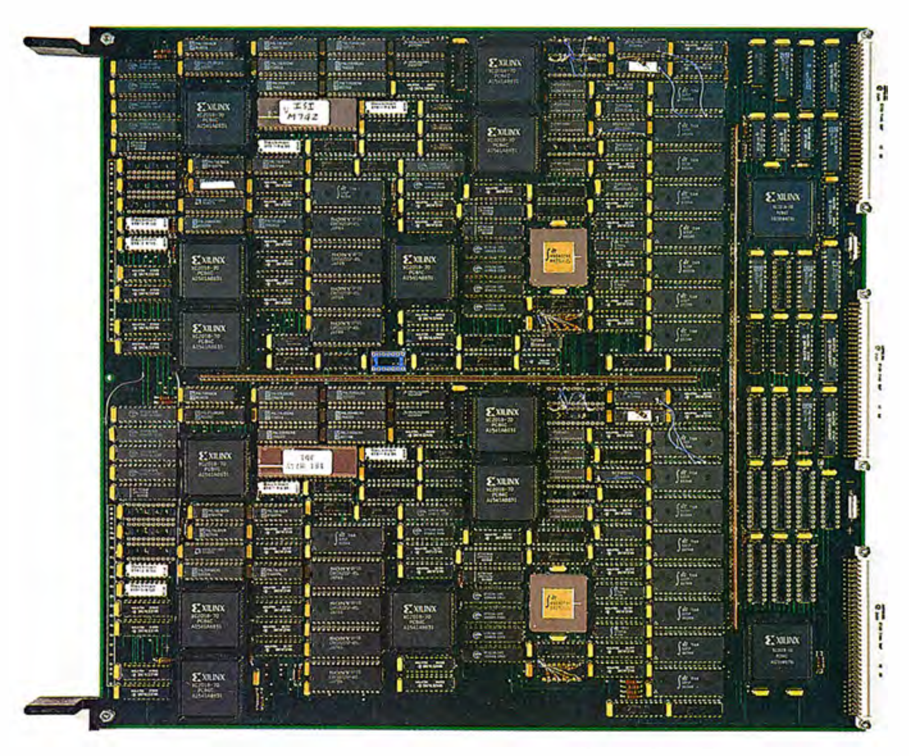
Aquí se pierde la partida. 51 ... g6-g5 hubiera dado a las blancas un margen demasiado pequeño para ganar la partida, concluiría Karpov más tarde.

52	Rg4-f5	Rf7-g7
53	Ta6-a7 (jaque)	Rg7-f8
54	e5-e6	Td4-e4
55	Ta7-d7	Te4-c4
56	Td7×d5	h5-h4
57	Td5-d3	Rf8-e7
58	Td3-d7 (jaque)	Re7-f8
59	Td7-h7	h6-h5
60	Rf5-e5	h4-h3
61	f4-f5	Rf8-g8
62	Th7×h5	a4-a3
63	Th5×h3	a3-a2

Un jugador humano hubiera preferido 63 ... Tc4-a4, para prolongar la lucha, pero entonces pronto prevalecerían los efectos de 64 Re5-f6.

64	Th3-a3	Tc4-c5 (jaque)
65	Re5-f6	Las negras abandonan

Pensamiento profundo se consideraba en desventaja de seis peones cuando menos, por lo que, en este punto, sus diseñadores decidieron abandonar. A la máquina le quedaban unos 20 minutos para hacer sus jugadas, mientras que a Karpov le quedaba menos de un minuto en su reloj; no obstante, para un jugador de su potencia, este tiempo es más que suficiente para lograr la victoria.



3. CORAZON DE CHATARRA de "Pensamiento profundo". Cabe en una placa del tamaño de una pizza. Cada uno de sus procesadores puede examinar 500.000 posiciones por segundo. En la máquina que le sucederá, se habrá convertido en un microcircuito y mil de ellos trabajarán en paralelo.

y a otras consideraciones. Una evaluación de la estructura de peones asigna a éstos puntuaciones dependientes de parámetros tales como su apoyo mutuo, su control del centro del tablero y la protección que ofrecen al rey. Una evaluación de peones pasados atiende a aquéllos que, por no tener en su columna la oposición de peones enemigos, podrían llegar hasta la octava fila y promoverse a damas. Una evaluación de estructura de hileras asigna valores a configuraciones más complicadas de torres y peones situados en una hilera determinada.

Comenzamos también a estudiar formas de optimizar los más o menos 120 parámetros que intervienen en la función de evaluación, y que están especificados en la programación. Tradicionalmente, han sido los programadores quienes han ajustado "a mano" los pesos que los programas asignaban al material –piezas y peones– y a las consideraciones posicionales. Creemos que nuestro programa es el único de los programas principales que va "sintonizando" los pesos automáticamente.

Adquirimos una muestra de 900 partidas de nivel de maestro y definimos arbitrariamente los pesos óptimos como aquellos que producen mejor sintonía entre las jugadas que la máquina considera mejores y las realmente efectuadas por los maestros ajedrecistas. Para reflejar esta estrategia, Campbell y Nowatzyk escribieron otra vez de principio a fin la programación de la función de evaluación. En vez de limitarse a asignar un valor numérico final a cada posición, la función de evaluación, en esta modalidad de autosintonía, entrega una ecuación que contiene una lista de términos lineales. En otras palabras, genera un vector.

Dos fueron los mecanismos de sintonía utilizados. El primero, al que dimos el nombre de "escalada", se limita a asignar un valor arbitrario a un parámetro de evaluación dado, y a efectuar seguidamente una exploración hasta una profundidad de cinco o seis estratos en cada posición de la base de datos de grandes partidas, para hallar las jugadas que haría la máquina. Procede seguidamente a ajustar el parámetro y recalcular todo. Si el número de coincidencias entre las elecciones del ordenador y las del gran maestro aumenta, el parámetro se ajusta en la misma dirección. El proceso continúa hasta que todos los parámetros han alcanzado su máximo rendimiento. Pero harían falta años para optimizar todos los parámetros por este método y, en consecuencia, solamente nos servimos de él en unos pocos casos difíciles.

Mucho más rápido era el segundo mecanismo de sintonía, propuesto y realizado por Nowatzyk. Fue evolución de la sencilla idea de hallar el ajuste óptimo entre la función de evaluación de posiciones de la máquina y sus presuntos valores óptimos. El ajuste óptimo es el que confiere mínimo valor medio al cuadrado del error, esto es, a la diferencia entre el valor auténtico y el dado por el modelo. Para nuestros fines, los valores auténticos pueden sustituirse por los resultados de exploraciones a gran profundidad (si se está procediendo al ajuste fino de un concepto conocido), o por comparación de las decisiones de la máquina con las de jugadores humanos de primera categoría.

Las partidas de muestra proporcionan vigorosos indicios sobre los valores relativos de las posiciones; después de todo, cualquier posición alcanzada tras la jugada de un gran maestro es verosímilmente superior a todas las que se habrían alcanzado con otras jugadas. En lugar de calcular el valor de una posición a partir de sus parámetros, Nowatzyk calculó los parámetros basándose en la diferencia supuesta entre la posición elegida por un maestro y las variantes desechadas por él. Su algoritmo es computable en sólo unos días y, a diferencia del método de escalada, no va mejorando los parámetros uno por uno, sino que lo hace simultáneamente con la colección completa.

Nuestra función de evaluación automáticamente sintonizada no parece peor, y sí acaso mejor, que las funciones de programas ajedrecísticos tan conocidos como Hitech y Cray Blitz, calibradas manualmente. No obstante, parece ser que la función evaluación de "Pensamiento profundo" sigue rezagada con respecto a las de máquinas comerciales de gama alta, que son fruto de muchos años-hombre de trabajo. Esperamos cerrar pronto la brecha con una mejor realimentación desde los procedimientos de sintonía automática.

Puede parecer extraño que nuestra máquina incorpore relativamente pocos conocimientos ajedrecísticos y sea empero capaz de vencer a excelentes jugadores humanos. Sin embargo, es preciso recordar que el ordenador no remeda al pensamiento humano, sino que alcanza el mismo fin por medios diferentes. Hasta ahora, "Pensamiento profundo" ve lejos, pero observa poco; lo recuerda todo sin aprender nada, y ni se dedica al egregio vagabundeo ni es capaz de elevarse por sí mismo más allá de su potencia normal. Y aun así, logra, de cuando en cuando, captar visiones que hasta los grandes maestros más cimeros han pasado por alto.

Tal vez fuese esta inhumana penetración de la máquina la causa de que

el gran maestro Kevin Spraggett decidiera tomarla como ayudante en la preparación del encuentro de cuartos de final del campeonato del mundo frente al gran maestro Artur Yusupov. La participación de la máquina no tuvo efectos discernibles sobre el encuentro, pero sí estableció un precedente de cierto interés.

En octubre de 1989, una versión experimental de "Pensamiento profundo", dotada con seis procesadores, jugó un torneo de exhibición a dos partidas contra el campeón del mundo, Gary Kasparov, en Nueva York. Aunque la nueva versión era capaz de explorar más de dos millones de posiciones por segundo, Kasparov dio cuenta de ella con toda facilidad. El resultado no fue nada sorprendente; sí lo fue en cambio la debilidad del juego de "Pensamiento profundo".

En febrero de 1990, "Pensamiento profundo" jugó una partida de exhibición contra Anatoly Karpov, ex campeón del mundo y aspirante contra Kasparov al título mundial de 1990. Los defectos que afloraron en la programación experimental de las versiones de seis y cuatro procesadores nos hicieron retornar a la versión biprocesador. "Pensamiento profundo", aprovechando cierto número de refinamientos en su función de evaluación, desarrolló a lo largo de las primeras 50 jugadas una de sus mejores partidas, para cometer luego un burdo error en una clara posición de tablas. Una versión estable de seis procesadores habría tenido velocidad suficiente para evitarla.

Velocidad es ahora la palabra clave en el Centro Thomas J. Watson, donde se está procediendo al diseño de la nueva máquina. Debería ser por lo menos 1000 veces más rápida que su predecesora. Por consiguiente, la máquina que tenemos en mente habrá de examinar más de 1000 millones de posiciones por segundo, suficientes para explorar hasta una profundidad de 14 o 15 estratos en la mayoría de casos, y de 30 a 60 en líneas forzadas. De seguir manteniéndose la relación observada entre velocidad de procesamiento y potencia de juego, la nueva máquina poseería un nivel de 3400, unos 800 puntos más que "Pensamiento profundo" en la actualidad y 500 por encima de Kasparov.

Para lograr tal velocidad, Hsu está diseñando un microprocesador específico para ajedrez, capaz de examinar al menos tres millones de jugadas por segundo, tres veces más que la actual capacidad de "Pensamiento profundo". También está proyectando un sistema de cómputo de funcionamiento en paralelo que permita aunar la potencia de 1000 de tales microprocesadores, para multiplicar la ganancia por un factor 300 cuando menos. Anantharaman y Campbell están perfeccionando diversos aspectos de la actual versión de "Pensamiento profundo", para que tales mejoras puedan también incorporarse a la nueva máquina. Nowatzyk se interesa ahora por otras cuestiones.

Estamos convencidos de que el sistema dispondrá de potencia suficiente, en virtud de su misma velocidad, para plantear serias dificultades al campeón del mundo. Y creemos, además, que la adición de una larga lista de otros perfeccionamientos previstos permitirá que la máquina acabe por vencer, quizás ya en 1992.

Kasparov sigue disintiendo y nosotros respetamos su opinión. En una comunicación privada, concedió que una máquina capaz de examinar 1000 millones de posiciones por segundo podría vencer a los grandes maestros "corrientes", y añadió: "¡Pero no a Karpov ni a mí!" Kasparov estima que los jugadores de más alto nivel deberían ser capaces de prepararse para sacar partido de las peculiares debilidades que las máquinas presentan. Mantiene que la creatividad e imaginación de los humanos, y en particular *su propia* creatividad e imaginación, han de triunfar, sin duda, sobre un mero ensamblaje de hilos de cobre y pedacitos de silicio.

Cuando ambas opiniones entren en colisión sobre un tablero, se habrán enfrentado el ingenio de una persona de supremo talento y el trabajo de generaciones de matemáticos, científicos informáticos e ingenieros. Estamos convencidos de que el resultado no revelará si las máquinas pueden pensar, antes bien, nos mostrará si el esfuerzo colectivo humano llegará a brillar con mayor fulgor que los máximos logros de las personas más capaces y mejor dotadas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BELLE. J. H.. Condon y Ken Thompson en *Chess Skill in Man and Machine*. Segunda edición. Dirigido por P. W. Frey. Springer-Verlag, 1984.

CHESS 4,5—THE NORTHWESTERN UNIVERSITY CHESS PROGRAM. David J. Slate y Lawrence R. Atkin en *Chess Skill in Man and Machine*. Segunda edición. Dirigido por P. W. Frey. Springer-Verlag, 1984.

LARGE SCALE PARALLELIZATION OF ALPHA-BETA SEARCH: AN ALGORITHMIC AND ARCHITECTURAL STUDY WITH COMPUTER CHESS. Feng-hsiung Hsu. Tesis doctoral. Carnegie-Mellon University Computer Science Department, CMU-CS-90-108, febrero de 1990.

Impronta parental de los genes

Aunque el padre y la madre transmitan genes idénticos a los hijos, sus efectos pueden ser quizá distintos. La impronta diferencial de los genes en función del sexo podría condicionar el desarrollo normal y provocar enfermedades

Carmen Sapienza

En sus primeros experimentos con guisantes, realizados a mediados del siglo XIX, Gregor Mendel hizo una observación que, andando el tiempo, se convertiría en axioma para los genetistas. Observó que, al cruzar líneas puras de guisantes lisos con líneas puras de guisantes rugosos, todas las plantas de la descendencia híbrida producían guisantes lisos. El resultado era independiente de la planta lisa empleada en el cruzamiento: se tratara del macho o la hembra. Mendel había descubierto el principio de equivalencia en los cruzamientos recíprocos, esto es, el gen se comportará siempre de la misma manera, sin importar que venga de la madre o del padre.

El alcance de la observación de Mendel en la historia y práctica de la genética no puede minusvalorarse. Se ha comprobado su validez para muchos rasgos genéticos, no sólo del guisante, sino también de la mosca de la fruta, ratones, el hombre y muchos otros organismos.

Recientemente, sin embargo, genetistas y embriólogos han descrito algunos rasgos que no obedecen esas reglas. Antes bien, se trata de características gobernadas por la impronta genómica, proceso éste que marca o graba diferencialmente a los genes de manera transitoria y reversible, según se transmitan a través de la hembra o del macho. Los descendientes que reciben los genes marcados de la madre difieren de quienes los reciben del padre. Dicho en otras palabras, importa saber de qué progenitor se recibe determinado gen.

CARMEN SAPIENZA abrió camino en la investigación de la influencia de la impronta genética en el desarrollo de ciertas enfermedades genéticas y cánceres. Dirige el laboratorio de genética del desarrollo del Instituto Oncológico Ludwig en Montreal.

Científicos de varios laboratorios repartidos por todo el mundo investigan la naturaleza molecular de la impronta genómica, el mecanismo que la establece y el número y tipos de genes que reciben dicha huella. Aunque no son aún grandes los logros, sí hemos descubierto algunos aspectos fascinantes, que nos están permitiendo ampliar el conocimiento sobre ciertos cánceres, enfermedades genéticas y otros males. Las investigaciones sobre la impronta genómica pueden incluso poner de manifiesto algunas influencias, hasta ahora insospechadas, sobre la herencia de los caracteres que se explicaban antaño en el marco de la genética mendeliana clásica.

Excepciones a la regla de la reciprocidad en los cruzamientos se conocen desde hace mucho tiempo, pero generalmente se incluyen en una de las categorías siguientes. Dentro de la primera se encuentran los caracteres ligados a genes de los cromosomas sexuales, X e Y. Las hembras de los mamíferos tienen dos cromosomas X en todos los núcleos de sus células, mientras que los machos tienen un cromosoma X y otro Y. La ceguera a los colores y la hemofilia son dos de los muchos caracteres determinados por genes presentes en el cromosoma X. La herencia de estos caracteres ligados al sexo sigue un patrón bien definido que no exige la equivalencia en los híbridos recíprocos.

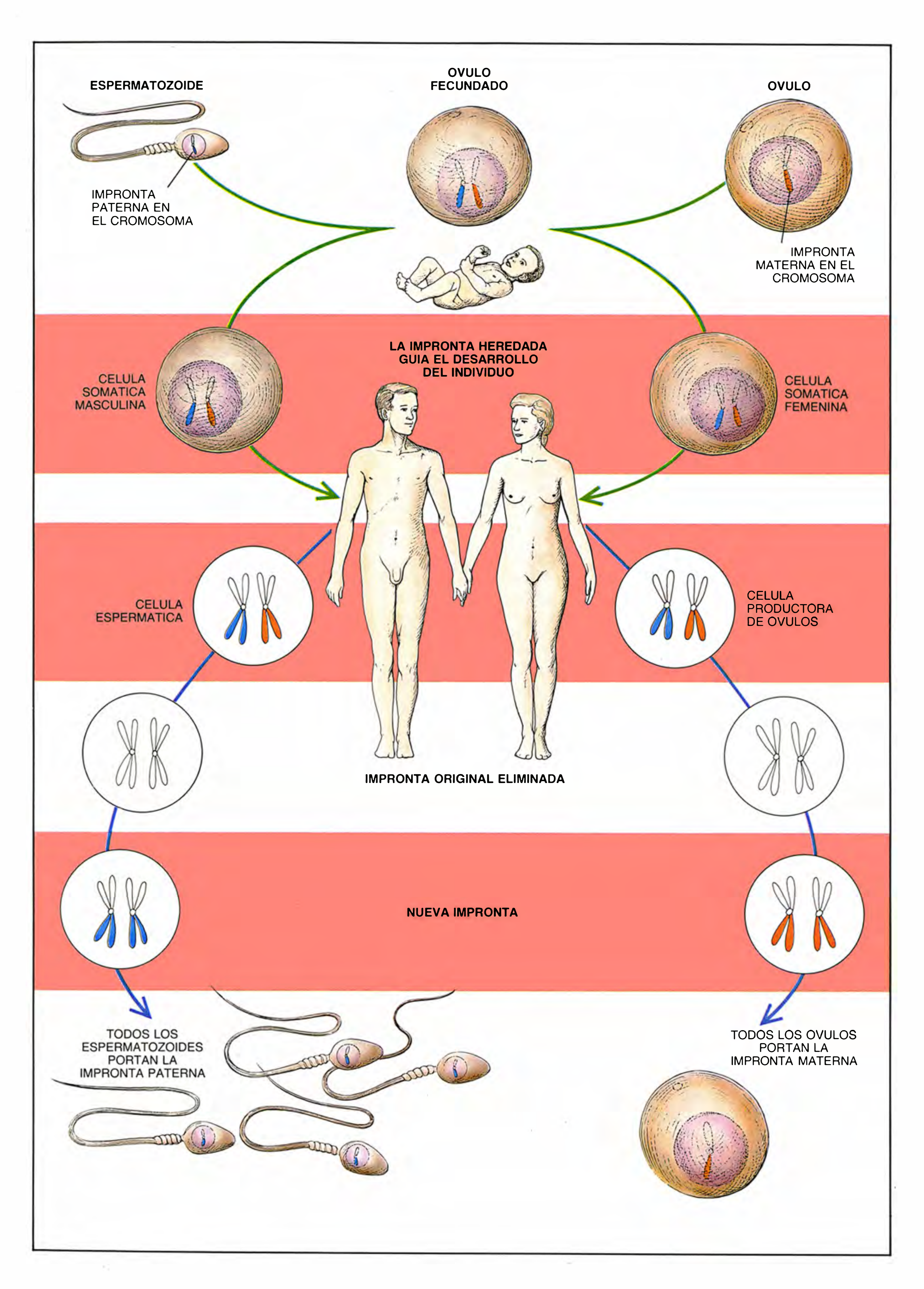
Si un hombre ciego a los colores se empareja con una mujer que no porta ese carácter, por ejemplo, ninguno de sus hijos será ciego a los colores. Si la madre es ciega a los colores y el padre no, entonces todos los hijos heredarán la anomalía. En ambos casos, las hijas portarán el gen de la ceguera a los colores, pero no sufrirán la enfermedad.

La herencia y manifestación de los caracteres ligados al sexo dependen del sexo de los descendientes, aunque no directamente del sexo del progenitor portador del carácter.

La segunda clase de cruzamientos recíprocos no equivalentes pone en juego caracteres controlados por genes que residen fuera del núcleo celular. Ciertos orgánulos subcelulares –mitocondrias en células animales y mitocondrias y cloroplastos en células vegetales– portan su propia información genética. Esos orgánulos se transmiten de generación en generación a través del citoplasma de la célula huevo; por tanto, se heredan exclusivamente por vía materna. El color de las hojas en algunas plantas muestra esa forma de herencia, igual que la encefalomiopatía mitocondrial, un tipo de enfermedad neuromuscular humana.

La impronta genómica, la tercera y más reciente de las excepciones a la regla de la equivalencia en los cruzamientos recíprocos, difiere notablemente de los tipos antes mencionados. Los rasgos a los que afecta no dependen necesariamente de genes presentes en los cromosomas sexuales, ni están asociados con orgánulos heredados por vía materna. La impronta puede, al menos en teoría, afectar a cualquier gen celular. Las excepciones ligadas al sexo y a orgánulos de herencia materna descansan sobre una desigual contribución genética de los progenitores. No ocurre así en los casos de impronta genómica: los progenitores pueden transmitir a la descendencia genes exactamente iguales, aunque con efectos distintos si la impronta recibida difiere en cada uno. Estas nue-

1. GENES MARCADOS por la impronta, alojados en los cromosomas de óvulos y espermatozoides. Los dos sexos heredan, por consiguiente, unos genes con impronta paterna y otros con impronta materna. Sin embargo, cuando los hijos producen óvulos o espermatozoides, se pierde la impronta precedente, y se induce otra nueva, específica del sexo del individuo en cuestión, en todos los cromosomas de sus gametos.


ESPERMATOZOIDE
OVULO FECUNDADO
OVULO
IMPRONTA PATERNA EN EL CROMOSOMA
IMPRONTA MATERNA EN EL CROMOSOMA
LA IMPRONTA HEREDADA GUIA EL DESARROLLO DEL INDIVIDUO
CELULA SOMATICA MASCULINA
CELULA SOMATICA FEMENINA
CELULA ESPERMATICA
CELULA PRODUCTORA DE OVULOS
IMPRONTA ORIGINAL ELIMINADA
NUEVA IMPRONTA
TODOS LOS ESPERMATOZOIDES PORTAN LA IMPRONTA PATERNA
TODOS LOS OVULOS PORTAN LA IMPRONTA MATERNA



2. CRUZAMIENTOS en los que el gen responsable de un carácter es aportado por la madre en uno de los casos y por el padre, en el otro; este tipo de cruzamientos se denominan recíprocos. Para la mayoría de los caracteres, como el aspecto liso en el guisante, no importa cuál de los dos progenitores porte el gen (*izquierda*). Ciertos caracteres, como el color de las hojas en algunas plantas, sólo se heredan a través de la madre (*centro*). En los caracteres ligados a los cromosomas sexuales, como el color de las alas de la polilla *Abraxas*, el patrón de herencia es más complejo (*derecha*).

vas circunstancias han polarizado la atención de muchos biólogos.

Gran parte del interés actual por los caracteres afectados por la impronta genómica tiene su origen en los experimentos realizados por James McGrath y Davor Solter, del Instituto Wistar de Anatomía y Biología de Filadelfia, y por M. Azim H. Surani y sus colaboradores, del Instituto de Fisiología Animal de Cambridge, Inglaterra. McGrath y Solter desarrollaron un elegante procedimiento microquirúrgico, denominado transferencia nuclear, para intercambiar físicamente la información genética entre dos embriones de ratón. Esta técnica aprovecha la circunstancia de que, una vez fecundado el óvulo por un espermatozoide, pero antes de que el embrión comience a dividirse, el núcleo del óvulo y el del espermatozoide permancen separados durante un breve intervalo de tiempo en el citoplasma de la célula huevo. Los dos núcleos son visibles al microscopio óptico y presentan una posición y tamaño característicos.

Con una aguja de cristal hueca muy fina, se puede extraer selectivamente, del óvulo fecundado, cualquiera de los dos núcleos, o ambos a la vez. Se puede así reemplazar uno de los núcleos por otro procedente de un huevo fecundado distinto. McGrath y Solter encontraron que si sustituían un núcleo espermático por otro, o si sustituían un núcleo procedente del óvulo por otro, el embrión que resultaba se desarrollaba a término, sin distinguirse de un ratón normal de la misma estirpe.

La transferencia nuclear permitía también a los investigadores crear embriones con constituciones genéticas insólitas, por ejemplo, embriones con las dos series de cromosomas de uno de los progenitores. McGrath, Solter y Surani tenían curiosidad por observar el desarrollo de tales embriones. Crearon ginogenotes (embriones con dos series cromosómicas maternas) y androgenotes (embriones con dos series de cromosomas paternos); compararon sus desarrollos con los de embriones normales.

Conviene resaltar que, debido al alto grado de consanguinidad de los ratones utilizados en esos experimentos, machos y hembras portaban series idénticas de cromosomas (salvo, por supuesto, que las hembras carecen de cromosoma Y y los machos sólo tienen un cromosoma X). Si el desarrollo de un embrión de ratón dependiera exclusivamente de su dotación de genes, en teoría no debería importar que un ratón recibiese todos los genes de uno de los progenitores, o lo que es lo mismo, ginogenotes, androgenotes y ratones normales deberían experimentar idéntico desarrollo.

No es eso lo que ocurre. Los embriones con dos series de genes de procedencia materna o paterna no llevan su desarrollo a término, sino que éste se detiene cuando las divisiones alcanzan unas pocas docenas de células. Si el desarrollo continúa, cosa que sucede ocasionalmente, los ginogenotes y androgenotes presentan unas curiosas diferencias en las anomalías que exhiben. En los ginogenotes de estadios más avanzados, los embriones presentan aberraciones menores mientras que sus placentas y membranas vitelinas (estructuras esenciales para la nutrición del animal) se hallan severamente atrofiadas. En los androgenotes avanzados se observa el fenómeno opuesto: las membranas vitelinas y placentas parecen casi más normales, mientras que los embriones son débiles y escasamente desarrollados.

Como las secuencias de ADN presentes en los cromosomas de los embriones ginogenéticos, androgenéticos y normales eran las mismas, McGrath, Solter y Surani concluyeron que los genes habían sufrido algún tipo de modificación o impronta diferencial, que dependía de su origen, materno o paterno. Este proceso de impronta parecía desactivar selectivamente algunos genes que, en condiciones normales, debían intervenir durante el desarrollo embrionario temprano. De los genes aportados por el padre, algunos decisivos para el desarrollo embrionario parecían estar inactivos; de los aportados por la madre parecían inactivos aquellos cuya participación era imprescindible para la formación de la placenta y la membrana vitelina.

Otra demostración gráfica del fenómeno de impronta fue ofrecida por Bruce M. Cattanach, del Consejo de Investigaciones Médicas en Oxford. Cattanach llevaba años investigando el fenómeno de la no equivalencia en los cruzamientos recíprocos. Para el estudio de tales caracteres utilizaba líneas de ratones que portaban una o más parejas de cromosomas fusionados. En tales ratones, algunos cromosomas estaban físicamente conectados y, por tanto, no se podían separar durante la meiosis, el proceso de división celular que da lugar a óvulos y espermatozoides. En consecuencia, durante la división, una célula recibiría dos copias de un cromosoma y la otra, ninguna.

Si un óvulo con dos réplicas de un cromosoma es fecundado por un espermatozoide sin ninguna, el embrión resultante contendrá el número normal de cromosomas, aunque las dos copias de uno de los cromosomas procederían de la madre. De la misma manera, las dos copias las aportaría el padre si el espermatozoide portase ambos cromosomas y el óvulo nin-

guno. De acuerdo con la regla de equivalencia de los híbridos recíprocos, todos los animales resultantes de ese tipo de cruzamientos deberían ser idénticos. Sin embargo, los experimentos de Cattanach demostraron, inequívocamente, que tal regla no se cumplía para varios de los cromosomas del ratón.

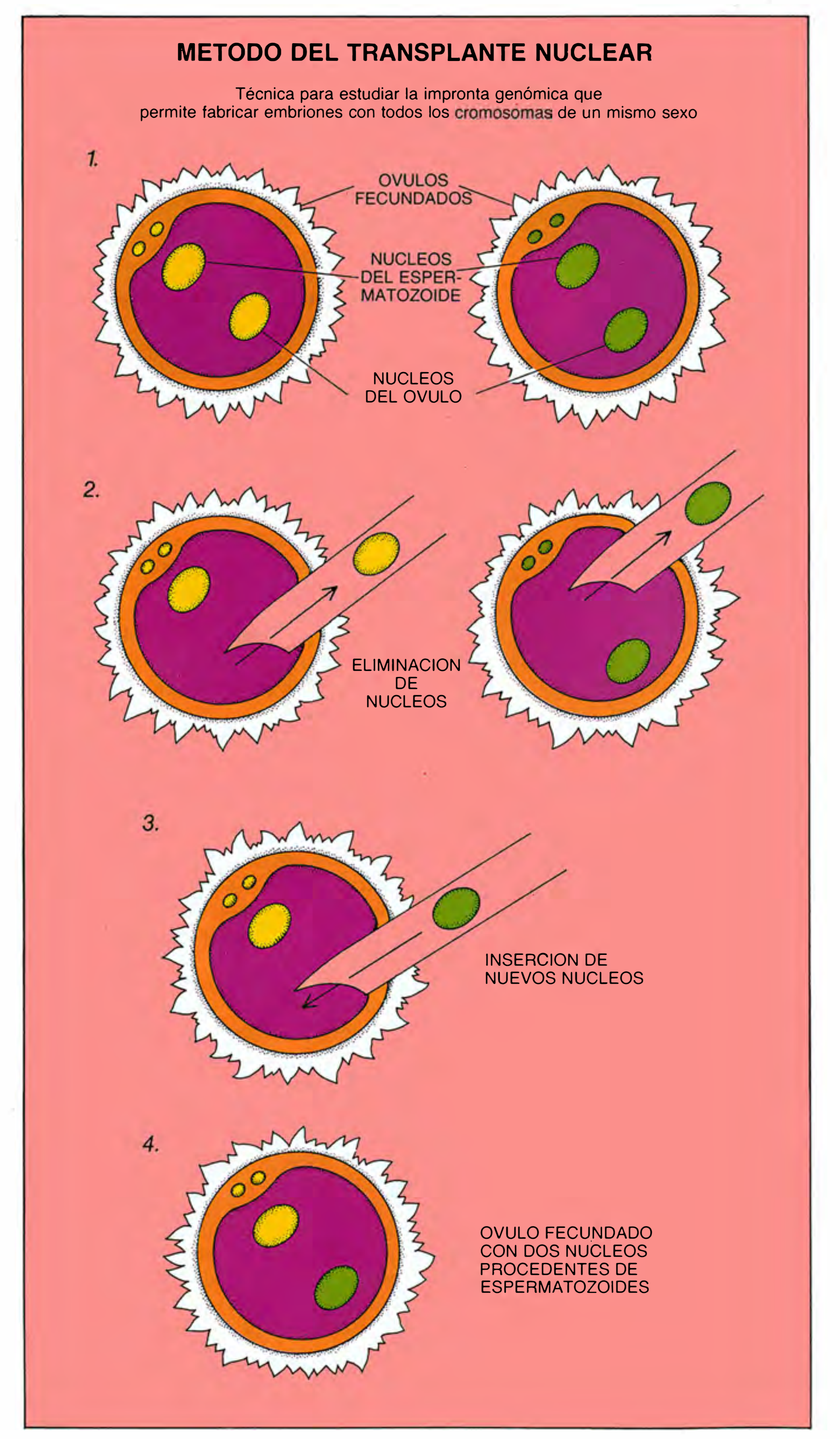
Cattanach encontró, por ejemplo, que los ratones que heredaban las dos copias del cromosoma 11 de uno de los progenitores diferían en tamaño y peso de los ratones normales. Criados en las mismas condiciones, los ratones con dos cromosomas 11 de origen materno eran anormalmente pequeños, mientras que aquellos que lo heredaban de su padre eran gigantescos. Experimentos similares realizados con otras parejas de cromosomas fusionados producían otras aberraciones características, como la muerte del embrión y anomalías del comportamiento.

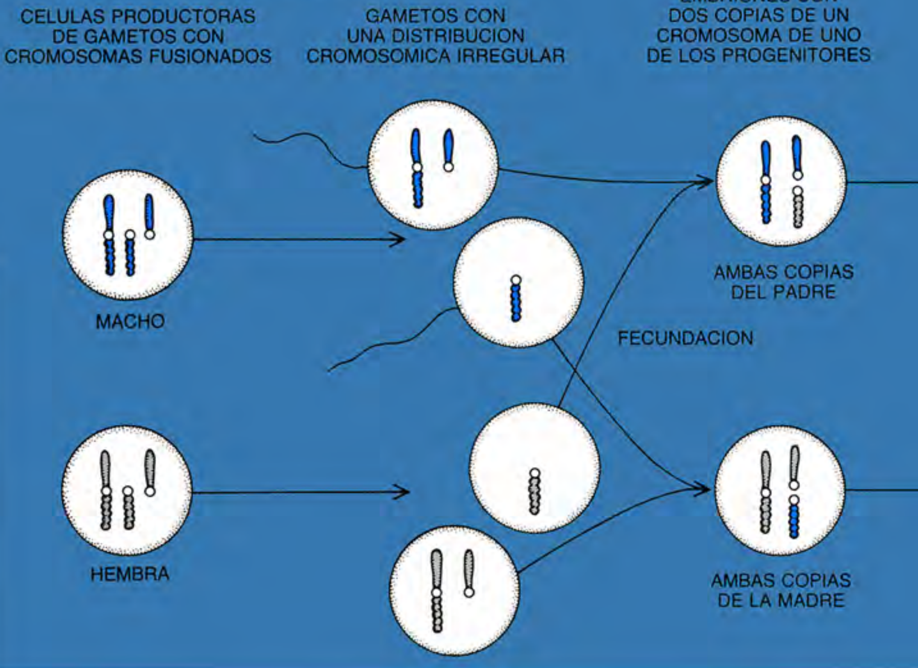
Los experimentos de Cattanach demostraban también otro punto importante: los efectos de la impronta genómica no persisten en la siguiente generación. La impronta no supone, por tanto, una modificación permanente del cromosoma. Un pequeño ratón macho con las dos copias del cromosoma 11 de su madre produciría descendencia de tamaño normal. Los genes procedentes de la madre pierden su impronta femenina para ser de nuevo etiquetados como genes de macho.

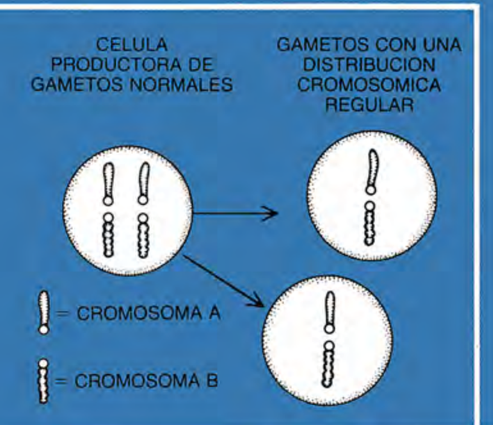
Inspirados por los descubrimientos de McGrath, Solter, Surani y Cattanach, investigadores de varios laboratorios (entre ellos el mío) han tratado de determinar si la impronta genómica débese a una modificación directa del ADN. En particular, nosotros hemos estudiado el papel de la metilación del ADN, proceso en virtud del cual pequeños grupos moleculares se engarzan químicamente a una macromolécula de ADN [véase "Una herencia distinta", por Robin Holliday; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1989]. Para nuestra satisfacción, hemos comprobado una frecuente metilación diferencial de genes particulares en función de su herencia, materna o paterna; tales modificaciones son reversibles. Pero no se sabe todavía si las modificaciones constituyen el mecanismo primario del proceso de impronta en el genoma o sólo reflejan otro fenómeno bioquímico subyacente y desconocido.

No todos mis colegas coinciden conmigo, pero apostaría a que la metilación del ADN es mera consecuencia del mecanismo primario. Afortunadamente para todos los que estudiamos este fenómeno, todavía podemos acometer muchos experimentos importantes sin necesidad de conocer las causas últimas de la impronta genómica. Sea cual sea el mecanismo por el que se realiza la impronta, ésta se manifiesta de formas que son a menudo extrañas, y algunas veces trágicas.

Las manifestaciones trágicas aparecen en varias enfermedades humanas. La naturaleza provoca a veces situaciones, en el hombre, que son similares a las estudiadas por Cattanach en el ratón. Robert D. Nicholls y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina de Harvard, han hecho recientemente un descubrimiento de este tipo en pacientes con el síndrome de Prader-Willi, una enfermedad con síntomas de retraso mental, obesidad extrema, corta estatura y manos y







EL EFECTO DE LA IMPRONTA y su observación en algunos de los descendientes de los ratones con cromosomas fusionados. Cuando un ratón normal produce óvulos o espermatozoides (gametos), todos los gametos resultantes portan sólo una copia de cada cromosoma (*recuadro*). En los ratones con cromosomas fusionados, sin embargo, algunos de los gametos pueden tener dos copias de un cromosoma, o ninguna. Las combinaciones de esos gametos originan animales con dos copias de un cromosoma de uno de los progenitores.

pies desproporcionadamente pequeños. Tras examinar los genomas de pacientes con síndrome de Prader-Willi y los de sus parientes, Nicholls llegó a la conclusión de que muchos pacientes habían heredado las dos copias del cromosoma 15 de sus madres.

Nicholls, Joan H. M. Knoll, también de Harvard, y su colega Charles A. Williams, de la Universidad de Florida, obtuvieron luego un descubrimiento parecido, aunque contrastante, en pacientes con síndrome de Angelman. (Antiguamente, a esas personas se las describía como "marionetas felices", ya que sonríen constantemente, tienen movimientos espamódicos y otros síntomas de retraso mental y motor.) Los pacientes presentaban frecuentemente deleciones parciales del cromosoma 15 heredado de la madre; el único cromosoma 15 completo era el del padre.

Es sorprendente que dos enfermedades con un cuadro clínico tan dispar puedan estar ligadas a una impronta diferencial de los mismos genes en el mismo cromosoma. Ahora bien, a diferencia de los ratones anormalmente grandes y pequeños que Cattanach producía en sus experimentos, los síndromes de Prader-Willi y Angelman no pueden fácilmente atribuirse a las dos caras de la misma moneda, causados por un exceso o un defecto del mismo producto génico. Los estudios de Nicholls y sus colaboradores ilustran la dificultad de predecir la posible reacción de ciertos caracteres ante el proceso de impronta. Sería por tanto útil reexaminar muchos trastornos congénitos en el marco de la hipótesis de la impronta.

Podrían hallarse afectados incluso los caracteres para los que no existe una necesidad obvia de recurrir a la influencia de la impronta genómica. Así lo ilustran ciertos cánceres infantiles: el rabdomiosarcoma embrionario (un tumor muscular), el tumor de Wilm (un tipo de cáncer de riñón) y el osteosarcoma (cáncer de hueso).

Para explicar en qué medida la impronta genómica puede estar implicada en esas enfermedades, quizá sea útil recordar cómo se supone que se producen esos cánceres. Muchos cánceres obedecen, eso se cree, a la acumulación de sucesivas mutaciones en genes específicos de una sola célula. El cromosoma 11, por ejemplo, porta un gen, *Rd*, que pertenece a una familia de oncogenes recesivos, genes supresores de tumores o antioncogenes [véase "En busca del antioncogén", por Robert A. Weinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1988]. En ausencia del producto de *Rd*, una célula muscular se transforma en célula cancerosa y, finalmente, origina un rabdomiosarcoma.

Como cada núcleo celular contiene dos copias del cromosoma 11, para que una célula se transforme las dos copias de *Rd* deben estar inactivas. La primera copia de *Rd* puede inactivarse de varias maneras; la más simple, una mutación que altere la secuencia de ADN del propio gen. Si se da dicha mutación, cualquier acontecimiento genético adicional que inactive la otra réplica de *Rd* hará, probablemente, que la célula se convierta en cancerosa. Con frecuencia, los episodios genéticos que destruyen la segunda *Rd* borran el cromosoma entero, o la parte de éste que contiene el gen.

Junto con mis colegas Heidi J. Scrable y Webster K. Cavenee, del Instituto Oncológico Ludwig de Montreal, hemos propuesto un mecanismo alternativo para explicar algunos cánceres pediátricos. A tenor de nuestra hipótesis, el episodio que inactiva la primera copia de un oncogén recesivo no tiene necesariamente que ser una verdadera mutación. Puede ser la impronta genómica, que inactiva genes diferencialmente en machos y hembras. (El segundo episodio, que es el que pone en marcha el proceso de transformación, podría ser una deleción u otro accidente.) En nuestra opinión, las células del rabdomiosarcoma tendrían, por mor de la impronta, una réplica inactiva del gen *Rd* en el cromosoma 11 intacto. Dicho cromosoma sería aportado por el mismo progenitor en la mayoría de los casos de rabdomiosarcoma embrionario.

Nuestro laboratorio, y los de Grady F. Saunders, del Centro M. D. Anderson de Estudios Tumorales de Houston, Manfred Mannens, de la Universidad de Amsterdam, Masao Sasaki, de la Universidad de Kioto, y varios autores más, han encontrado pruebas que apoyan esta teoría. El primer episodio inactivador en el rabdomiosarcoma embrionario, el tumor de Wilms y el osteosarcoma, casi



siempre ocurre en un oncogén recesivo presente en un cromosoma de origen paterno. Los datos son congruentes con la participación de la impronta genómica en la génesis de esos tumores. No obstante, esos mismos datos plantean también una dificultad teórica importante.

El escollo se presenta cuando la mayoría de los que estudiamos el fenómeno de la impronta genómica la imaginamos como una consecuencia de las grandes diferencias fisiológicas y bioquímicas que existen en la formación de gametos (espermatozoides y óvulos) en machos y hembras. A lo largo de la mayor parte de su vida adulta, los machos producen miles de millones de espermatozoides a partir de una población de células en continua división. Por el contrario, las hembras nacen con todos los óvulos que producirán en sus años fértiles. A medida que esos óvulos maduran, uno o muy pocos de ellos cada vez, se produce la ovulación, de una forma regular.

Si la impronta diferencial fuese sólo reflejo de la dicotomía entre la producción de gametos en machos y hembras, cabría suponer que todos los machos establecerían la impronta en sus genomas de una manera, y la hembras de otra. Ante la falta de pruebas en sentido contrario, suponíamos que todos los miembros de un sexo ejecutarían su impronta de la misma manera.

Ahora bien, los datos que relacionaban los cánceres pediátricos con oncogenes recesivos inactivos de procedencia paterna contradecían nuestra presunción. Si todos los machos marcasen con su impronta e inactivasen el gen *Rd*, por ejemplo, la incidencia de rabdomiosarcoma embrionario sería altísima: con un solo cambio genético en el *Rd* heredado de la madre, algunas células de cualquier individuo se volverían cancerosas. Como esos tumores son raros (afectan, aproximadamente, a uno de cada 20.000 niños), es improbable que todos portemos un oncogén recesivo inactivo y heredado de nuestro padre. No obstante, en los individuos que sufren esas enfermedades, eso es precisamente lo que parece haber ocurrido.

Una explicación provisional de esa discrepancia sería que no todos los machos (o hembras, presumiblemente) marcan e inactivan los mismos genes. ¿Cuáles serían las bases de esas diferencias entre los individuos?

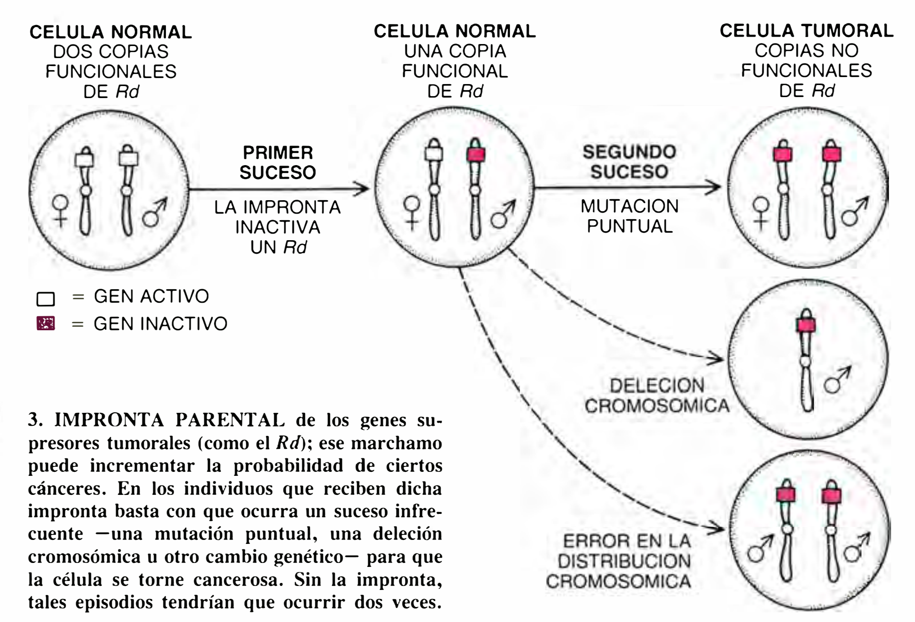
Si uno es en el fondo un genetista, siempre debe recurrir primero a su disciplina para responder las cuestiones de ese tenor. La explicación genética requiere la existencia de uno o más genes responsables de la impronta. (No confundirse con los propios genes que reciben la impronta.) En otras palabras, la impronta debe ser un proceso que resulte de la actividad de diversos genes que operan de una manera diferencial en machos y hembras. Personas del mismo sexo con diferentes genes controladores del proceso de impronta diferirán también en su dotación de genes marcados con dicha impronta. La mayoría de los machos, por ejemplo, no inactivarán al gen *Rd*; sólo lo harán aquellos, poco frecuentes, que porten una copia aberrante de uno de los genes que controlan la impronta.

La idea de que la expresión de un gen o la represión de la misma puede ser controlada por otros genes no es nueva. Describe un antiguo y bien conocido fenómeno en genética: la modificación de la dominancia. Muchos caracteres responden a la actividad de otros genes que modifican su expresión. La impronta genómica puede contemplarse como un caso especial de modificación de la dominancia. El único e insólito rasgo de esos genes modificadores que se postulan como implicados en el control de la impronta genómica es su actividad diferencial en machos y hembras.

La enfermedad de Huntington (EH) constituye un interesante ejemplo de carácter que parece estar modificado por una impronta genómica específica y ligada al sexo. La EH, una enfermedad neurológica fatal, se hereda de forma dominante: todo el que reciba el gen EH de alguno de sus padres sufrirá la enfermedad. Generalmente, la enfermedad se manifiesta en los adultos, diagnosticándose como edad media a los 38 años. Aproximadamente el 10 por ciento de los casos, no obstante, se manifiestan en la infancia, y afectan a niños de hasta dos años y medio.

Como ya habían observado los investigadores médicos en un principio, el 90 por ciento de los niños afectados procedían de familias en las que el padre era el progenitor interesado. Por supuesto, en esos casos, padre e hijo portan el mismo carácter deletéreo, pero la modificación sufrida por el paso a través del padre ha sido la causa evidente de que la enfermedad aparezca en su hijo a una edad más temprana.

A lo largo de los años se han ido sucediendo las hipótesis sobre el comportamiento genético de la EH. De todos, el modelo de Charles D. Laird, de la Universidad de Washington, es el que más se ajusta a los datos existentes. El modelo de Laird introduce como principal innovación el concepto de efecto de posición, un fenómeno bien estudiado en la mosca de la fruta, que determina la expresión variable de ciertos caracteres. A diferencia de los demás caracteres mutantes, éstos presentan el aspecto insólito de no expresarse en todas las células en los tejidos afectados. Por contra, los tejidos son mosaicos formados por células mutadas y otras, diríase, perfectamente normales. La proporción



3. IMPRONTA PARENTAL de los genes supresores tumorales (como el *Rd*); ese marchamo puede incrementar la probabilidad de ciertos cánceres. En los individuos que reciben dicha impronta basta con que ocurra un suceso infrecuente —una mutación puntual, una deleción cromosómica u otro cambio genético— para que la célula se torne cancerosa. Sin la impronta, tales episodios tendrían que ocurrir dos veces.

de células que expresan la mutación está controlada por genes modificadores, que pueden cambiar el balance desde un tejido casi normal hasta casi mutante.

Laird razonó que, si la variabilidad en la edad de aparición de la EH reflejaba un mosaicismo variable en la expresión del gen de la EH, tal mosaicismo estaba probablemente influenciado por genes modificadores. Un gen modificador que inclinara la balanza del mosaicismo hacia una mayor cantidad de tejido mutante, determinaría un adelanto en la edad de aparición de la enfermedad. La situación contraria retrasaría la edad de aparición. (Hay casos de pacientes de EH que no han sufrido la enfermedad hasta los 70 años.)

Laird explicó, además, que la mayor incidencia de casos de EH juvenil por herencia paterna se debía a la localización del gen modificador en el cromosoma X. Como los machos tienen sólo un cromosoma X, cualquier aberración de su gen modificador no podría ser compensada, como sería el caso en las hembras, que portan dos cromosomas X. Es más probable, por tanto, que los varones tengan descendencia en la que el balance del mosaicismo esté inclinado hacia la situación de mayor cantidad de tejido mutante, lo que determina una mayor probabilidad de aparición temprana de la enfermedad. El diez por ciento de los casos de EH juvenil procede de familias en las que la madre, y no el padre, es la afectada. Pero eso es lo esperado; también cabe presumir que existan mujeres con genes modificadores aberrantes en sus dos cromosomas X, aunque esos casos son mucho más raros.

Este modelo parece explicar razonablemente bien la genética de tan complicada enfermedad. En mi trabajo he retocado ligeramente el modelo de Laird, para reflejar con mayor precisión el comportamiento de los genes modificadores. Esta pequeña aportación permite una aproximación incluso mayor al comportamiento genético real de la EH.

En mi opinión, se puede decir que el modelo de Laird de la genética de la EH, basado en el efecto de posición, casi cierra el círculo de los estudios sobre impronta genómica. Hasta donde llegan mis conocimientos, el primer estudio en profundidad sobre impronta genómica fue realizado por Janice Spofford, de la Universidad de Chicago, sobre un efecto de posición en la mosca de la fruta. El trabajo de Spofford, publicado en 1959, recibió escasa atención. Durante los últimos 30 años han aparecido también, esporádicamente, otros estudios sobre caracteres genéticos cuya expresión dependía del progenitor que transmitía el gen particular. Caracteres en organismos tan dispares como la mosca de la fruta, levaduras, maíz, ratones y seres humanos, se ven afectados por el fenómeno de la impronta genómica.

A pesar de todo eso, la impronta genómica sigue constituyendo, para muchos biólogos, mera curiosidad limitada a unos pocos caracteres. En algunas ocasiones me han preguntado por qué gasto mi tiempo (y, de paso, el del interpelante) en un fenómeno de tan escasa trascendencia. Siempre he respondido que el número de caracteres afectados por la impronta genómica, aunque desconocido, podría ser importante. Mi respuesta suele provocar una mirada de incredulidad, seguida de una disertación de uno o dos minutos sobre los principios de Mendel, que culmina con el tajante pronunciamiento de que la mayoría de los caracteres no funcionan "de esa manera".

Las críticas tienen su punto de razón. Si la mayoría de los caracteres mostrasen una dependencia absoluta del progenitor que transmite el gen en cuestión, los genetistas lo habrían advertido. La clave de la discrepancia, sin embargo, puede muy bien estar en la profundidad con la que los investigadores examinan un carácter particular. Cuando Spofford estudió la expresión en mosaico de los caracteres mutantes en la mosca de la fruta, observó los mismos caracteres en toda la descendencia de los cruzamientos recíprocos, igual que Mendel. Sin embargo, había suficientes diferencias en la expresión del carácter como para que pudiese discriminar qué progenitor había contribuido a ellas.

De la misma manera, el trabajo realizado en mi laboratorio, y en el de mi colega Alan C. Peterson, del Instituto Ludwig, ha demostrado que varios caracteres del ratón son mosaicos. Si uno se pregunta sólo por la presencia de tales caracteres, la respuesta es afirmativa; ahora bien, si la pregunta inquiere cuán intensa es su expresión, entonces apreciarán los efectos de la impronta parental. Para algunos caracteres, el grado de expresión quizá no sea muy importante; para otros, podría resultar decisivo. Por ejemplo, puede significar la diferencia entre padecer el tumor de Wilms o no, o manifestar la EH a los 5 años o a los 70.

Una de las áreas más prometedoras para investigar el efecto de la impronta genómica puede ser la herencia de las enfermedades humanas complejas. Desconocemos de qué manera puede contribuir este enfoque al desentrañamiento de tales enfermedades, pero el éxito, al menos teórico, que hemos alcanzado con la enfermedad de Huntington y algunos cánceres pediátricos me mueve a ser optimista.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIFFERENTIAL IMPRINTING AND EXPRESSION OF MATERNAL AND PATERNAL GENOMES. D. Solter en *Annual Reviews of Genetics*, vol. 22, págs. 127-146; 1988.

A MODEL FOR EMBRYONAL RHABDOMYOSARCOMA TUMORIGENESIS THAT INVOLVES GENOME IMPRINTING. H. Scrable y cols. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 86, n.º 19, págs. 7480-7484; octubre de 1989.

El efecto fotorrefractivo

Un haz de láser que atraviese un cristal produce de pronto una cascada luminosa. Este efecto fotorrefractivo puede servir para el desarrollo de ordenadores ópticos

David M. Pepper, Jack Feinberg y Nicolai V. Kukhtarev

Cuando Arthur Ashkin y sus colaboradores de los laboratorios Bell descubrieron el efecto fotorrefractivo hace unos 25 años, consideraron que este fenómeno, mera curiosidad científica, constituía en cambio una molestia para su trabajo. Las cosas han dado un vuelco. Los materiales fotorrefractivos están entrando en una nueva generación de ordenadores que operan con luz, en vez de electricidad.

Ashkin estaba experimentando con un cristal de niobiato de litio ($LiNbO_3$) con la esperanza de que transformara un color de una intensa luz de láser en otro (un proceso conocido técnicamente con el nombre de generación de segundo armónico). En el transcurso de sus ensayos, hizo que un haz de láser atravesara el cristal. Al principio, el cristal se comportó admirablemente bien, permitiendo que la luz pasara a su través sin sufrir perturbación alguna. Sin embargo, al cabo de algunos minutos el cristal empezó a distorsionar el haz, difundiendo la luz por todo el laboratorio. La luz del láser había modificado las propiedades del cristal mismo. El cristal seguía presentando efecto fotorrefractivo durante días. Pero si los investigadores bañaban el cristal en un haz luminoso uniforme, transmitía de nuevo un haz no distorsionado.

A lo largo de los últimos 25 años los investigadores han descubierto una amplia variedad de materiales fotorrefractivos, entre los que hay aislantes, semiconductores y compuestos orgánicos. Al igual que sucede con las emulsiones fotográficas, los materiales fotorrefractivos se alteran en cuanto se exponen a una luz intensa, responden lentamente cuando se iluminan con luz suave y recogen los detalles más nimios cuando incide sobre ellos radiación luminosa de compleja estructura. A diferencia de las películas fotográficas, los materiales fotorrefractivos se pueden borrar: las imágenes se pueden almacenar o eliminar a voluntad.

Gracias a su sensibilidad, robustez y propiedades ópticas singulares, los materiales fotorrefractivos pueden aprovecharse para la fabricación de elementos de procesado de datos en los ordenadores ópticos. En teoría, estos dispositivos permitirían que los ordenadores ópticos procesaran la información con muchísima mayor celeridad que sus homólogos electrónicos. Utilizando materiales fotorrefractivos, los investigadores han desarrollado ya la contrapartida óptica de los transistores: cuando dos haces de luz láser interaccionan en el seno de un material fotorrefractivo, uno de ellos puede controlar, conectar, desconectar o amplificar el segundo haz. Los materiales fotorrefractivos son también el elemento clave de los dispositivos que definen los perfiles de las imágenes, conectan las redes de láseres y almacenan imágenes tridimensionales.

Dado que las propiedades ópticas de los materiales fotorrefractivos pueden ser modificadas por la misma luz que los atraviesa, se les considera medios ópticos no lineales. En los medios ópticos lineales —lentes, prismas y filtros polarizadores—, los haces luminosos se limitan a cruzarse, sin modificar las propiedades del material.

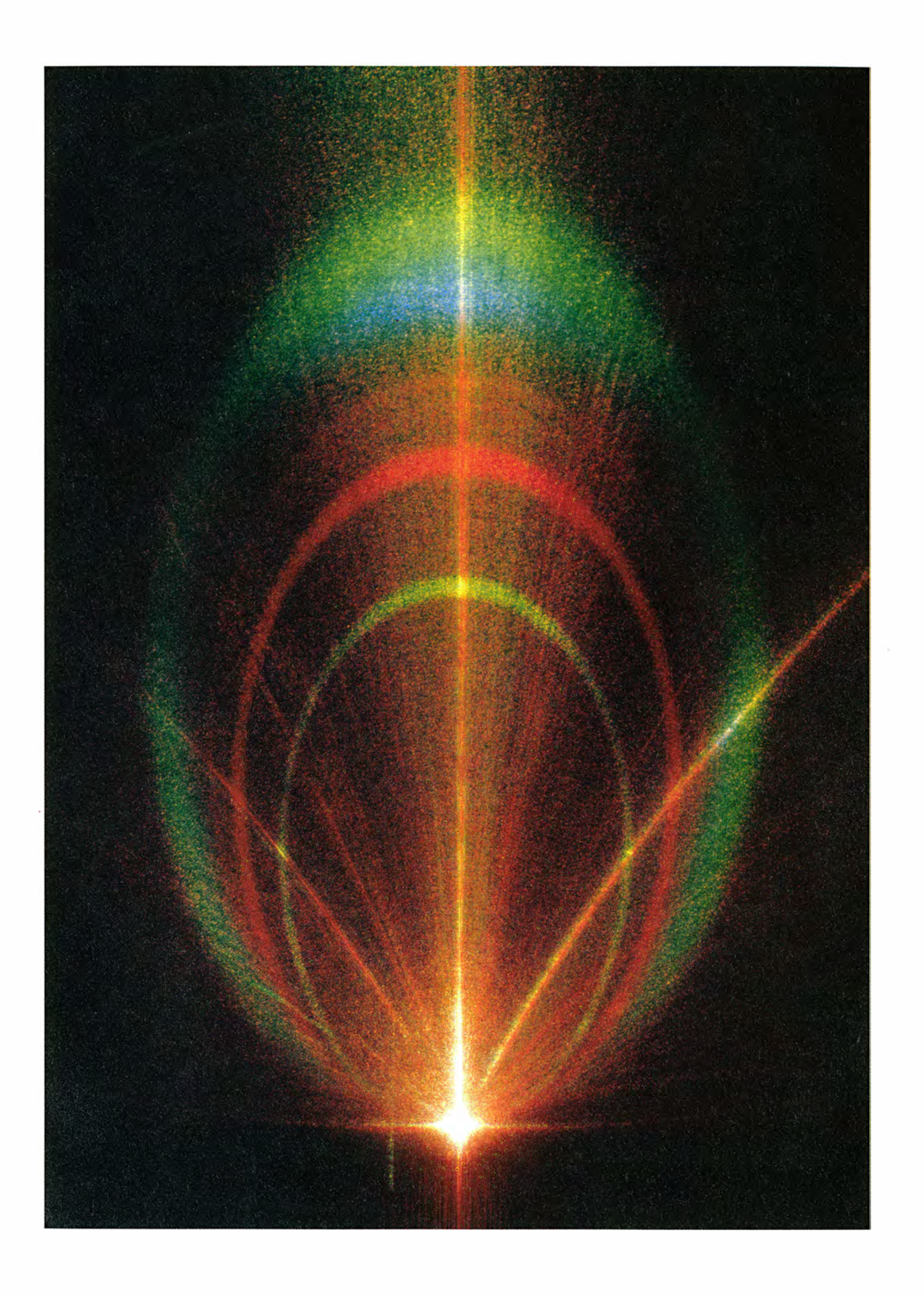
El efecto fotorrefractivo guarda una estrecha relación con otro fenómeno no lineal: el efecto fotocrómico. La luz que incide sobre un material fotocrómico cambia la cantidad de luz que absorbe el medio en cuestión. Los materiales fotocrómicos, que se emplean en la fabricación de ciertos tipos de lentes de sol, se oscurecen cuando reciben la brillante luz solar y se aclaran en las habitaciones oscuras.

En los materiales fotorrefractivos, la luz que incide sobre dichos materiales afecta a la velocidad con que la luz se mueve en su seno. En otras palabras, el efecto fotorrefractivo es un proceso por el que la luz modifica el índice de refracción de un material. (El índice de refracción es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad con que la luz se propaga en el material.)

Los índices de refracción de la mayoría de los materiales transparentes varían si la luz que incide sobre ellos alcanza intensidad suficiente. La luz es una onda electromagnética en movimiento cuya intensidad de campo eléctrico es proporcional a la raíz cuadrada de la intensidad lumínica. Así, un haz luminoso con una intensidad de 100 millones de watt por centímetro cuadrado equivale a una intensidad de campo eléctrico del orden de 100.000 volt por centímetro. Cuando una luz tan intensa atraviesa un material transparente, altera las posicio-

DAVID M. PEPPER, JACK FEINBERG y NICOLAI V. KUKHTAREV escribieron una parte de este artículo en las playas de Hawai, sin abandonar su participación en un ensayo sobre el efecto fotocrómico: dejar que el sol bronceara su piel. Pepper trabaja en el departamento de física óptica de los laboratorios de investigación Hughes y da clases en la Universidad de Pepperdine. En 1980 recibió su doctorado en física aplicada en el Instituto de Tecnología de California. Feinberg es profesor de física e ingeniería eléctrica en la Universidad de California del Sur. Se doctoró en 1977 por Berkeley. Kukhtarev se halla adscrito al Instituto de Física de Kiev, en Ucrania. En 1983 recibió el título de doctor por sus estudios sobre la teoría de la holografía dinámica.

1. UN HAZ DE LASER se abre en abanico al incidir sobre un cristal de titanato de bario de 5 milímetros, en virtud del efecto fotorrefractivo.



nes de sus átomos, cambiando el valor del índice de refracción en algunas partes por millón. En virtud de este cambio, el material se comporta como un prisma o una lente y desvía la luz.

El término "fotorrefractivo" se reserva, empero, para designar los materiales cuyo índice de refracción lo altera la acción de haces luminosos de baja intensidad. En los materiales fotorrefractivos, incluso haces de luz con intensidades de sólo una milésima de watt por centímetro cuadrado son capaces de alterar la disposición de los átomos en un cristal, variando el índice de refracción en algunas partes por 10.000. Al contrario de lo que sucede en la mayoría de los materiales transparentes, el cambio experimentado en los cristales fotorrefractivos es semipermanente: si un cristal alterado se aísla de todas las fuentes luminosas, el cambio en su índice de refracción puede durar desde algunos milisegundos hasta varios años, dependiendo del material. Y, así, el cristal puede almacenar información en forma de imágenes.

¿Cómo es posible que un débil haz de luz produzca semejante cambio en el índice de refracción de un cristal? A finales de los años sesenta, F. S. Chen, de los laboratorios Bell, avanzó el modelo básico del efecto fotorrefractivo. A imagen de la hormiga solitaria que es capaz de mover un montón de arena transportando los granos uno a uno, el haz de luz de baja intensidad puede acabar produciendo un campo eléctrico intenso moviendo las cargas eléctricas una a una. En los cristales fotorrefractivos, las cargas se difunden desde las regiones más brillantes hacia las regiones más oscuras. A medida que las cargas se van desplazando, la intensidad del campo eléctrico en el interior del cristal aumenta, llegando a alcanzar valores muy elevados, de hasta 10.000 volt por centímetro. Este campo eléctrico deforma ligeramente la red cristalina (en una cuantía del orden del 0,01 por ciento) y altera, con ello, el índice de refracción.

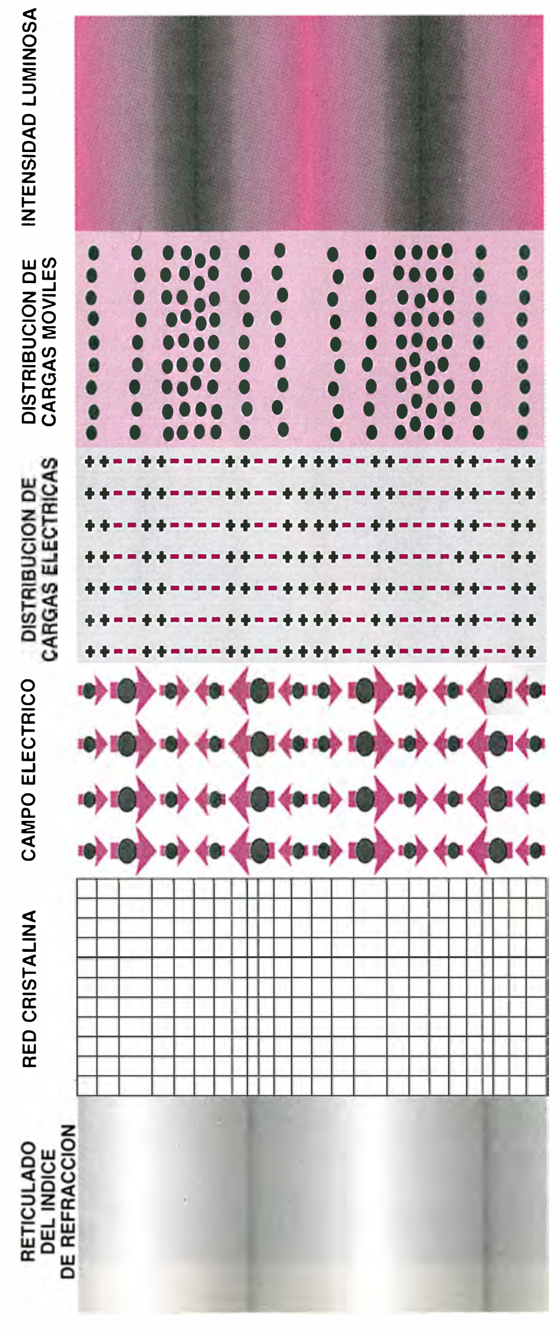
La fuente de estas cargas eléctricas yace, al parecer, en los defectos de la red cristalina del material. Puede tratarse de imperfecciones físicas en la estructura reticular (falta de átomos en ciertos lugares de la red), contaminantes sustituyentes (presencia de átomos extraños en determinados sitios de la red) o contaminantes intersticiales (átomos extraños intercalados entre los átomos constitutivos de la red). Cantidades muy pequeñas de estos defectos, del orden de algunas partes por millón, pueden causar el efecto fotorrefractivo.

Cada uno de los defectos de un cristal puede dar lugar a una carga eléctrica adicional. Estas cargas pueden ser electrones (partículas de carga negativa) o huecos (regiones de carga positiva), dependiendo de cada cristal en particular. En la oscuridad, estas cargas se hallan sujetas; en presencia de luz, las cargas vagabundean libremente en el seno del cristal hasta que terminan atrapadas de nuevo. Cuando la luz ilumina las cargas de una región del cristal, éstas emigran de la misma y se acumulan en las zonas oscuras, cual cucarachas que se refugian tras los muebles huyendo de la luz.

Cada carga que se mueve en el interior del cristal deja tras de sí una carga inmóvil del signo opuesto. En la región que media entre estas cargas positivas y negativas, el campo eléctrico alcanza su intensidad más elevada y la red cristalina resulta deformada al máximo. Cuando un haz luminoso atraviesa esta región del cristal experimenta un índice de refracción diferente del que existe en las regiones sin afectar.

El tiempo que tarda un haz luminoso en reorganizar las posiciones de las cargas de un cristal depende de la intensidad de la luz y de la velocidad

MODIFICACION DE LAS PROPIEDADES OPTICAS DE UN CRISTAL FOTORREFRACTIVO POR LA LUZ



1. Dos haces de láser interfieren en un cristal fotorrefractivo y forman una estructura de regiones claras y oscuras.

2. Los electrones móviles se alejan de las regiones claras del cristal.

3. Los electrones móviles se acumulan en las regiones oscuras, dejando atrás regiones con cargas positivas.

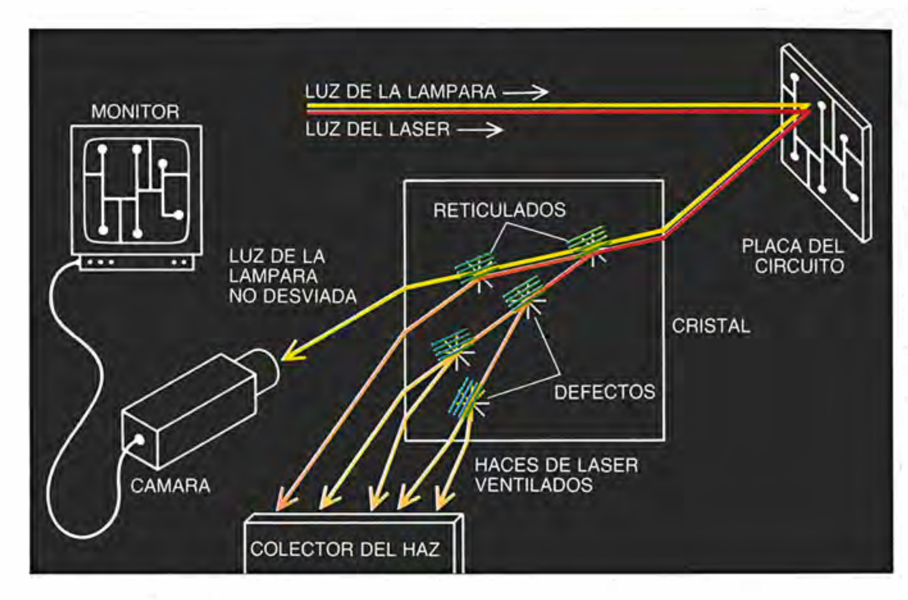
4. Entre las regiones con carga positiva y negativa se crea un campo eléctrico.

5. El campo eléctrico deforma la red cristalina.

6. La deformación hace que la luz se mueva más despacio a través de unas regiones y más deprisa a través de otras. En otras palabras, el índice de refracción del material queda alterado periódicamente. El reticulado del índice de refracción está desplazado espacialmente un cuarto de período respecto a la estructura de la luz.

de migración de las cargas en el seno del cristal. La luz débil necesita más tiempo que la luz intensa para originar un campo eléctrico determinado. En el caso de luz de baja intensidad (del orden de 0,01 watt por centímetro cuadrado), el tiempo necesario para que las cargas alcancen sus posiciones de equilibrio puede durar algunos minutos. Si se trata de luz de alta intensidad (del orden de mil millones de watt por centímetro cuadrado), el tiempo de respuesta puede ser inferior al nanosegundo. Al igual que sucede con una película fotográfica, un cristal fotorrefractivo necesita cierta cantidad de luz para completar su "exposición".

El cambio en el índice de refracción es linealmente proporcional a la intensidad del campo eléctrico si la red cristalina carece de simetría de inversión. El campo eléctrico permanece en el cristal bastante después de que la luz ha dejado de actuar, de la misma forma que el montón de arena se mantiene en su nuevo emplazamiento mucho después de que las hormigas se hayan marchado.



2. CORTADOR OPTICO COHERENTE: difunde la luz intensa de un láser y transmite la luz débil de una lámpara de incandescencia. En el esquema representado en esta figura, el cortador protege una cámara de los rayos láser, perjudiciales. El haz de láser, constituido por luz de una sola frecuencia, se difunde en los defectos del cristal fotorrefractivo e interfiere consigo mismo. La figura de interferencia crea un reticulado del índice de refracción. En virtud de ello, la mayoría de la luz del láser se desvía hacia uno de los lados del cristal, mediante un proceso denominado "aventamiento del haz". La luz procedente de la lámpara de incandescencia, constituida en cambio por muchas frecuencias diferentes, no produce ni una figura de interferencia ni un reticulado; quiere ello decir que la mayor parte de la luz procedente de la lámpara se transmite a través del cristal.

Una de las consecuencias más útiles del efecto fotorrefractivo es el intercambio de energía entre dos haces de láser, proceso conocido también con el nombre de acoplamiento de dos haces. Cuando dos haces de láser de la misma frecuencia se cruzan, se produce una interferencia y aparece una estructura estacionaria constituida por una serie de regiones brillantes y oscuras, o más específicamente, una imagen cuya intensidad varía sinusoidalmente con la posición en el cristal. Si esta imagen sinusoidal de luz se forma en un cristal fotorrefractivo, el movimiento de las cargas eléctricas creará un campo eléctrico cuya intensidad variará también sinusoidalmente. El campo resultante deformará la red cristalina con arreglo a un esquema periódico similar, produciendo cambios en su índice de refracción. En el interior del cristal acabará por formarse un "reticulado del índice de refracción" (un holograma volumétrico del índice de refracción, como también se le conoce).

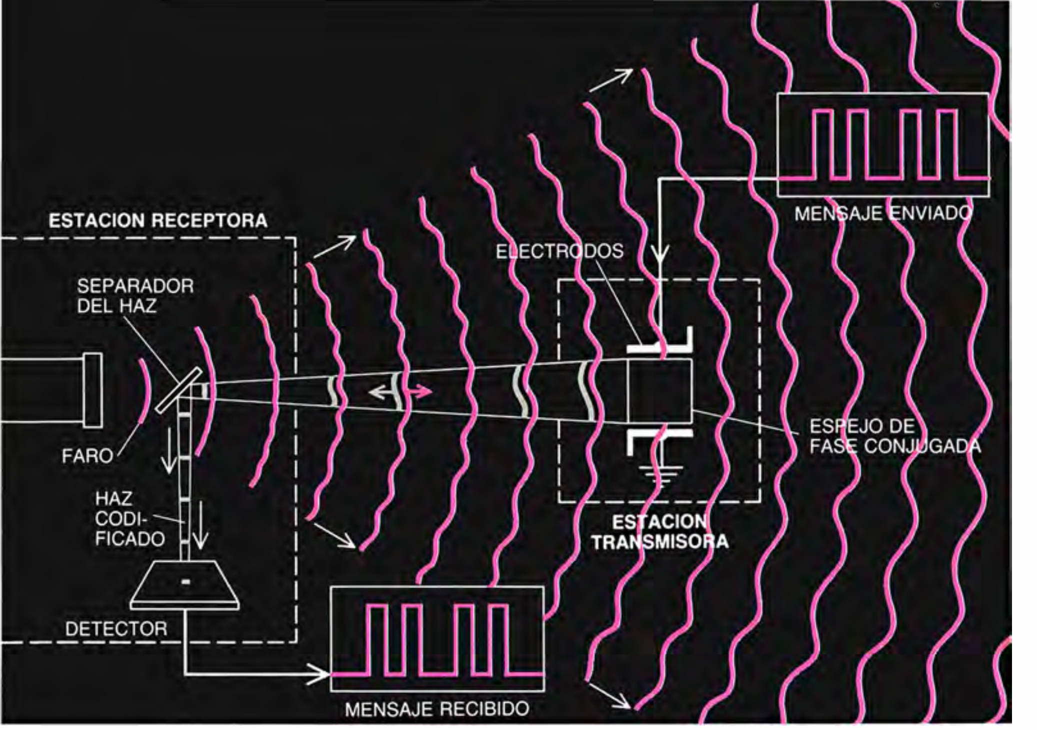
El campo eléctrico y el reticulado del índice de refracción poseerán la misma periodicidad que la imagen luminosa, pero ambos aparecerán desplazados en el espacio un cuarto de período respecto a la luz incidente. Este desplazamiento de fase de 90 grados constituye la configuración óptima para el intercambio de energía entre los dos haces de láser originales.

Una vez establecido en el cristal el reticulado del índice de refracción, parte de la luz de un haz será desviada, o difractada, por dicho reticulado en la dirección del otro haz (y viceversa). Por consiguiente, los dos haces desviados interferirán con los dos haces originales, constructivamente en un caso y destructivamente en el otro. En el caso de la interferencia constructiva, los picos de las ondas luminosas de uno de los haces desviados se combinan con los picos de uno de los haces originales, en virtud de lo cual los dos haces se refuerzan mutuamente. En el caso de la interferencia destructiva, los picos de las ondas de uno de los haces desviados coinciden con los valles del otro haz original, y las ondas luminosas se debilitan entre sí. El haz que resulte de la interferencia constructiva saldrá del cristal más fuerte de lo que había entrado, mientras que el haz que sufre la interferencia destructiva saldrá más débil. Así pues, uno de los dos haces habrá ganado energía a expensas del otro. La orientación del cristal y el tipo de portadores de carga (electrones o huecos) determinan cuál de los dos haces gana y cuál pierde.

Los materiales fotorrefractivos presentan la propiedad de acoplamiento entre dos haces debido a que la imagen óptica y el reticulado del índice de refracción se hallan desplazados espacialmente. En cambio, el acoplamiento entre dos haces no suele darse en la mayoría de los materiales no lineales, debido a que estos materiales responden "localmente" a los haces ópticos (por ejemplo, los campos eléctricos intensos de los haces de láser deforman los orbitales atómicos). Como consecuencia, las imágenes ópticas y los reticulados formados en la mayoría de los materiales no lineales quedan superpuestos. La luz desviada por el reticulado interfiere exactamente de la misma manera con cada uno de los haces sin desviar. Por tanto, los dos haces intercambian la misma cantidad de energía y ninguno de ellos aumenta en intensidad.

Los investigadores ya saben cómo controlar los flujos de carga en el interior de los cristales para realzar el efecto fotorrefractivo. Los dos mecanismos que permiten controlar el flujo de cargas en un cristal son la difusión y el arrastre. Estos dos procesos son análogos al arrastre y la difusión del humo que origina la combustión de un tronco de madera. Si se le deja a sus expensas, el humo se difundirá espontáneamente hacia las regiones de menor densidad. Pero si sopla un viento suave, el humo se moverá en una dirección determinada. Las partículas que constituyen el humo se comportan como las cargas móviles de un material fotorrefractivo: las cargas tienden a moverse hacia las regiones donde la densidad de carga es baja y experimentan un arrastre adicional en respuesta a cualquier campo eléctrico.

La simple difusión de las cargas desde las regiones iluminadas de un cristal hacia las oscuras no produce



3. ESPEJO DE FASE CONJUGADA construido con un cristal fotorrefractivo. Permite la comunicación a través de la atmósfera. La estación receptora emite un haz luminoso. Al atravesar la atmósfera, este haz se difunde y se distorsiona. El cristal fotorrefractivo de la estación transmisora refleja o transmite la luz que llega hasta él, dependiendo del voltaje aplicado a sus electrodos. Porque este cristal se comporta como un espejo de fase conjugada, la luz reflejada queda invertida temporalmente. La reflexión y transmisión alternativa de la luz permite codificar un mensaje. A medida que el haz temporalmente invertido que contiene el mensaje va interactuando con la atmósfera, se eliminan del haz todas las distorsiones y el mensaje se puede decodificar en la estación receptora.

los mayores campos eléctricos posibles. En 1981 Jean-Pierre Huignard y Abdellatif Marrakchi, de los laboratorios Thomson-CSF de Orsay (Francia), aplicaron un campo eléctrico exterior a un cristal fotorrefractivo para obtener un campo espacialmente variable cuya intensidad fuera mayor que la obtenida sólo por difusión. Sin embargo, el campo eléctrico aplicado desplazaba el reticulado del índice de refracción en una cuantía mucho mayor que el desplazamiento de fase óptimo (un cuarto de ciclo).

Para obviar ese desplazamiento espacial no óptimo del reticulado, Sergei I. Stepanov y Mikhail P. Petrov, del Instituto Físico-Técnico A. F. Ioffe de Leningrado, de la Academia Soviética de Ciencias, desarrollaron una técnica ingeniosa. Cuando aplicaban un campo eléctrico externo cuya dirección cambiaba muy rápidamente, las cargas se movían, de preferencia, en una dirección durante un semiciclo y en la dirección opuesta durante el semiciclo siguiente. Este proceso es similar a lo que sucedería si dos personas, encaradas, soplaran alternativamente una tea encendida. La columna de humo se intensifica y se difunde a la vez por un espacio mayor, pero su ubicación media será la misma que tendría de no existir viento alguno. En los cristales fotorrefractivos este proceso proporciona un campo eléctrico interno más intenso que el que produciría por sí solo un proceso de difusión, teniendo el reticulado del índice de refracción el mismo corrimiento de fase (un cuarto de ciclo) que habría si no actuara allí ningún campo.

Algunos investigadores han recurrido a esta técnica para aumentar el rendimiento del acoplamiento entre dos haces, así como para producir "aventamiento" de un haz (fenómeno que en el argot técnico se conoce por difusión fotorrefractiva estimulada hacia adelante). Descubierto en los años setenta, el aventamiento de un haz ("beam fanning") es probablemente uno de los fenómenos más sorprendentes de la óptica no lineal. Este efecto se observa cuando un haz fino y poco intenso de un láser de helio-neón incide sobre un cristal, de titanato de bario ($BaTiO_3$), por ejemplo. Al principio el haz atraviesa dicho cristal sin sufrir ninguna alteración. Aproximadamente al cabo de un segundo (el tiempo exacto dependerá de la intensidad de la luz), el haz empieza a difuminarse por el interior del cristal, desviándose hacia un lado. Durante este proceso, el haz desviado se divide en muchos rayos formando una figura parecida a un abanico luminoso (de aquí procede el nombre de "aventamiento" de un haz que se le ha impuesto a este efecto). En función del material fotorrefractivo utilizado, la sección transversal de la luz emergente puede consistir en una hermosa serie de figuras elípticas y poseer diferentes componentes de polarización.

El efecto de aventamiento de un haz es consecuencia del intercambio energético entre el haz luminoso incidente y la luz difundida al azar por los defectos del cristal. La luz difundida por cada defecto se interpone entre el haz no difundido, formando un reticulado del índice de refracción en virtud del efecto fotorrefractivo. Una vez producido este fenómeno, la luz no difundida puede transferir energía adicional al haz difundido. Ahora bien, el mecanismo de intercambio energético no es isotrópico; por ello, los haces luminosos difundidos resultan intensificados preferentemente dentro de un intervalo angular determinado. Ese haz difundido e intensificado se torna a difundir, al azar, por otros defectos del cristal; el proceso se repite. De todo ello resulta un gran número de haces difundidos que se despliegan en abanico arrancando del haz original. A tenor de la orientación del cristal y del punto por donde penetra el haz incidente, el haz abierto en abanico puede sufrir una curvatura según ángulos relativamente pequeños (desviándose apenas en el seno del cristal) o según ángulos bastante grandes (alcanzando lugares más alejados del cristal).

El aventamiento de haces y otros efectos fotorrefractivos se han utilizado en diferentes aplicaciones: cortadores de haces coherentes, elementos de interconexión óptica, espejos de fase conjugada, filtros renovadores y resaltadores de los perfiles de imágenes.

El cortador óptico coherente —que describieron en 1985 Mark Cronin-Golomb y Amnon Yariv, del Instituto de Tecnología de California— se halla capacitado para filtrar la luz difundida procedente de haces de láser de alta intensidad. El cortador ofrece la posibilidad de proteger los detectores ópticos sensibles, cuya utilización podría ser necesaria para controlar los láseres de alta potencia empleados en algunos procesos industriales como son el grabado térmico y la soldadura. Este dispositivo puede también servir de protección de las cámaras de vídeo [*véase la figura 2*].

El componente principal de un cortador óptico coherente es un cristal fotorrefractivo, colocado enfrente del detector o del objetivo de la cámara. El haz intenso puede ser apartado del detector gracias al efecto de aventamiento del haz, que guía la luz coherente del láser que atraviesa el cristal hacia uno de los lados del mismo. Sin embargo, el detector o la cámara

pueden registrar el objeto en presencia de luz intensa, pues la luz ambiental de fondo que resulta difundida por el resto del objeto atraviesa el cristal sin sufrir apenas alteración.

El efecto de aventamiento de haces desarrolla un papel importante en los espejos de fase conjugada construidos con materiales fotorrefractivos. Estos espejos poseen la propiedad singular de que un haz óptico "reflejado" por ellos se mueve hacia atrás en el espacio, exactamente como ocurriría de invertirse el tiempo. Merced a esta propiedad, los espejos de fase conjugada poseen infinidad de aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas, láseres de alta potencia y ordenadores ópticos. A título de ejemplo, estos dispositivos se incorporan en un sistema que corrige las aberraciones indeseadas, que los haces de láser experimentan en ocasiones cuando se propagan a través de medios distorsionantes o en los amplificadores de láser de alta potencia [véase "Aplicaciones de la conjugación de fase óptica", por David M. Pepper; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1986].

En 1977 Robert W. Hellwart, de la Universidad de California, propuso una configuración básica para los espejos de fase conjugada. Dos años más tarde, Sergei G. Odulov y uno de nosotros (Kukhtarev), e independientemente Huignard y sus colaboradores, elaboraron uno de estos espejos utilizando materiales fotorrefractivos. En 1982 otro de nosotros (Feinberg) descubrió casualmente un tipo especial de espejos de fase conjugada que muchos investigadores utilizan en la actualidad. Feinberg había dirigido tres haces de láser sobre un cristal de titanato de bario. Uno de los haces contenía las ondas luminosas cuya réplica de tiempo invertido se buscaba; los dos haces "de bombeo" adicionales eran necesarios para formar el espejo de fase conjugada (o al menos así lo creían en aquel entonces Feinberg y su equipo). Para comprobar los resultados de este experimento, Feinberg bloqueó los haces de bombeo, asegurándose así de que el supuesto haz de tiempo invertido no procediera de una simple reflexión en una de las caras del cristal. Al principio, el haz de tiempo invertido desaparecía obedientemente. Pero al cabo de poco tiempo, reaparecía para sorpresa de Feinberg: había descubierto un espejo de fase conjugada que sólo necesitaba un haz. El elegante dispositivo descubierto por Feinberg constituye un caso particular de un tipo más general de espejo de fase conjugada con autobombeo, que empezaron a estudiar Jeffrey O. White, Mark Cronin-Golomb, Baruch Fischer y Amnon Yariv.

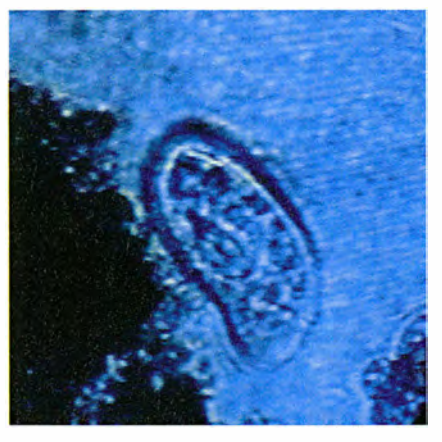
Aunque los espejos de fase conjugada se pueden fabricar con muchas clases de materiales ópticos no lineales, los elementos fotorrefractivos presentan claras ventajas. En primer lugar, los espejos necesitan un solo haz de entrada, precisamente aquel cuya réplica de fase conjugada se desea obtener, constituyendo de este modo el denominado conjugador de fase con autobombeo. Y en segundo lugar, el proceso que proporciona el haz de tiempo invertido se inicia ya con potencias e intensidades de láser muy bajas.

¿Por qué le gustan a la naturaleza los haces de fase conjugada? A esta pregunta planteada por Hellwarth se puede responder parcialmente, al menos en el caso del titanato de bario, tal como postularon hace algún tiempo Kenneth MacDonald, por entonces en la Universidad de California del Sur, y Feinberg. Al cabo de poco tiempo, el aventamiento de un haz provoca que la luz de láser incidente se desvíe preferentemente hacia uno de los lados del cristal. Si el haz incidente y el cristal se colocan de forma tal que el haz aventado se desvíe hacia una de las esquinas más alejadas del cristal, dicho haz sufrirá dos reflexiones internas, plegándose de hecho sobre sí mismo. Este haz reflejado se aventa de nuevo según la dirección del haz incidente. De entre todos los haces difundidos en el interior del cristal, el haz de tiempo invertido (en virtud de su trayectoria hacia atrás) gana más energía que cualquier otro de los haces difundidos. Este proceso de inversión de un haz puede resultar muy eficaz: hasta el 60 por ciento de la potencia del haz incidente emerge en haz de fase conjugada.

Uno de nosotros (Pepper) introdujo una variante adicional en este nuevo espejo de fase conjugada. Aplicó unos electrodos a un cristal fotorrefractivo para crear un campo eléctrico variable con el tiempo a lo largo del cristal. Cuando un haz de láser incide sobre este cristal, no sólo sufre una inversión temporal, sino que también se hace pulsante con el tiempo, como un espejo intermitente. La información pulsante se devuelve del espejo conjugado a la fuente de láser; el carácter de inversión temporal del haz garantiza que los dos puntos en comunicación permanezcan conectados entre sí. Este esquema puede aplicarse a la hora de establecer un canal de comunicación entre dos satélites, o para recibir información de un sensor remoto situado en uno de los extremos de un enlace de fibra óptica [*véase la figura 3*].

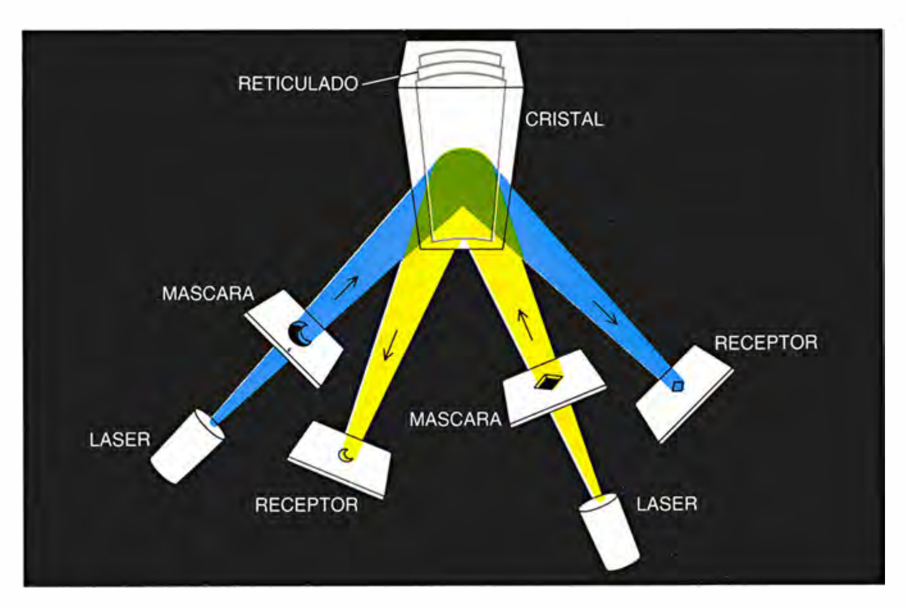
Otra aplicación basada en el mecanismo de intercambio de energía es un dispositivo conocido como filtro renovador, que resalta cuanto cambie de una escena muy compleja. Estos dispositivos permiten traer a un primer plano la presencia de aviones en movimiento sobre un fondo de edificios, a una saltadora de trampolín entrando en el agua o a una bacteria nadando con un fondo de algas en reposo.

En el filtro renovador diseñado por Cronin-Golomb (actualmente en la Universidad Tufts) se utilizan dos haces para iluminar un cristal fotorrefractivo. Una imagen está codificada espacialmente en el primer haz de láser. El cristal se orienta de forma tal que este haz transportador de imágenes transfiera la mayor parte de su energía al segundo haz. Tras pasar por el cristal, el haz transportador de imágenes queda casi completamente oscuro. Ahora bien, en cuanto cam-





4. PARAMECIO difuminado entre las algas y el fondo de lodo (*izquierda*). Cuando la imagen se observa a través de un filtro renovador, sólo aparece el microorganismo en movimiento (*derecha*). Los filtros renovadores realzan la imagen de un objeto que se mueve sobre un fondo estacionario. Estos filtros fueron diseñados por R. M. Pierce, R. Cudney, G. D. Bacher y Jack Feinberg.



5. USO DE CRISTALES FOTORREFRACTIVOS para acoplar dos haces de láser; este proceso se puede utilizar en los sistemas de comunicación, ordenadores ópticos u otras redes de láseres.

bie algo en el haz transportador de imágenes, el intercambio de energía se ve perturbado momentáneamente y la parte del haz que ha experimentado la modificación atraviesa el cristal. Esta parte del haz puede ser observada mediante un monitor de vídeo. Una vez el movimiento ha cesado, el haz transportador de imágenes quedará negro de nuevo al atravesar el cristal.

Los cristales fotorrefractivos se pueden utilizar también en otras aplicaciones para resaltar los perfiles de una imagen. Una imagen se puede codificar en un haz "objeto", que se envía a un cristal fotorrefractivo junto con un haz "de referencia". Los dos haces interfieren en el interior del cristal y forman un holograma de la imagen original. Esta imagen se puede recuperar mediante un tercer haz "de lectura", apuntado en una dirección opuesta a la del haz de referencia. Si el haz objeto es relativamente débil, la imagen reconstruida será una réplica fiel de la imagen original. Pero si el haz objeto es más intenso que los otros dos haces, se destacarán los perfiles de la imagen reconstruida.

La intensidad del haz objeto varía localmente en el cristal debido a que dicho haz contiene una imagen. Su intensidad se ajustará, por tanto, a la del haz de referencia en cada borde de la imagen, pues los bordes contienen una completa gama de intensidades, de brillantes a oscuras. Dondequiera que las intensidades de los dos haces coincidan exactamente, la figura de interferencia óptica correspondiente a esa región particular del cristal tendrá la máxima modulación posible entre las sucesivas zonas brillantes y oscuras. Esta marcada figura de interferencia originará un notable reticulado del índice de refracción. Cuando el haz de lectura interaccione con este reticulado, resultará desviado, o difractado, en dichas regiones; y, por consiguiente, aparecerán realzados los perfiles de la imagen resultante.

Los cristales fotorrefractivos pueden actuar como acopladores de energía y como espejos de fase conjugada; gracias a ello, hallan buenas perspectivas en interconectores ópticos reconfigurables y selectores de frecuencia de los láseres. Los cristales fotorefractivos suministran información desde un elemento óptico (por ejemplo, una fibra óptica) hasta otro (un elemento procesador de datos), sin necesidad de complicados elementos ópticos o de conexiones electrónicas. Esta forma de conexión óptica también provoca que dos o más láseres independientes se "conecten" entre sí de tal forma que ambos oscilen exactamente con la misma longitud de onda óptica; los dos láseres independientes se comportan esencialmente como otro mayor.

¿Cómo se conectan dos o más haces de luz incoherente en un cristal fotorrefractivo? Cuando los diferentes haces iluminan uno de estos cristales, cada uno de ellos despliega su abanico de haces difundidos y reticulados del índice de refracción (u hologramas) revueltos en el interior del cristal. Si uno de los hologramas correspondiente a uno de los haces coincide exactamente con uno de los hologramas del otro haz, entonces ese holograma particular se intensificará más rápidamente que los otros. Resultado de ello, los dos haces quedarán conectados entre sí. Este dispositivo recibe el nombre de espejo de fase conjugada con bombeo recíproco, o bombeo doble.

En el desarrollo de este dispositivo intervinieron, en 1987, Fischer (quien se halla hoy en el Technion de Haifa), sus colaboradores y Robert W. Eason y A. M. C. Smout, de la Universidad de Essex; más tarde trabajó en él Mark D. Ewbank, del Centro Internacional Rockwell de Thousand Oaks (California). Los espejos de fase conjugada con bombeo recíproco permiten conectar dos haces cualesquiera que procedan de cualquier dirección. Si estos dos haces contienen imágenes, cada una se convertirá en la otra conforme los haces atraviesen el cristal [*véase la figura 5*]. Si uno de los dos haces pulsa muy rápidamente, la información temporal se transmite al otro haz.

Si los dos haces proceden de láseres distintos que oscilan con frecuencias ligeramente diferentes, el haz de un láser se desviará en la dirección aproximadamente conjugada, o invertida temporalmente, del haz correspondiente al otro láser, y viceversa. Si ambos láseres están conectados ópticamente por un cristal, pueden, bajo ciertas condiciones, oscilar coherentemente, de modo que las frecuencias de ambos sean iguales. De acuerdo con estos principios, los investigadores esperan poder combinar miles de láseres semiconductores y obtener una fuente de luz coherente de muy alta potencia.

Para elaborar mejores dispositivos y componentes ópticos, los investigadores están buscando actualmente, entre la multiplicidad existente de materiales fotorrefractivos, los cristales más eficientes y fiables. Los materiales fotorrefractivos poseen muy diversas propiedades ópticas, eléctricas y estructurales. Así, tenemos aislantes, como el titanato de bario; semiconductores, como el arseniuro de galio, y compuestos orgánicos, como el 2-ciclooctilamino-5-nitropiridina contaminado con 7,7,8,8,-tetracianoquinodimetano.

Estos materiales de apariencia tan dispar presentan similares efectos fotorrefractivos. Todos ellos poseen una estructura cristalina relativamente fácil de distorsionar y todos contienen defectos que actúan como fuente de portadores de cargas y como sumideros de cargas. Sin embargo, bajo la influencia de un campo eléctrico, las cargas se mueven unas 10.000 veces más céleres en el arseniuro de galio que en el titanato de bario. Por

tanto, para la misma intensidad de luz incidente, el efecto fotorrefractivo se manifiesta mucho antes en el arseniuro de galio que en el titanato de bario. A pesar de ello, el reticulado del índice de refracción resultante no es tan fuerte en el arseniuro de galio como en el titanato de bario. Las propiedades ópticas de los cristales de los diferentes materiales varían también de forma apreciable: el arseniuro de galio y otros semiconductores son por lo general fotosensibles en la parte del espectro óptico correspondiente al infrarrojo cercano, en tanto que la mayoría de los aislantes y compuestos orgánicos son sensibles a la región visible del espectro.

Una gran cantidad de experimentos en curso se proponen identificar y controlar los defectos responsables del efecto fotorrefractivo en varios cristales. Por poner un caso, la fuente del efecto fotorrefractivo en el titanato de bario todavía constituye un interrogante: muchos investigadores lo atribuyen a la presencia de varios estados de ionización de diferentes impurezas de metales de transición, tales como el hierro, cobalto y manganeso; átomos de oxígeno que faltan en la red cristalina pueden contribuir también a los portadores de cargas. En el caso del arseniuro de galio, por otra parte, el efecto fotorrefractivo se atribuye a un defecto intrínseco de la red cristalina, que se cree debido a una combinación de un átomo de arsénico que reemplaza a un átomo de galio en la red junto con otro átomo de arsénico adicional situado en la misma celda de la red, constituyendo un centro EL2.

Al margen del carácter de los defectos cristalinos, las propiedades de la mayoría de los cristales fotorrefractivos se pueden modificar contaminándolos con impurezas o extrayendo algunos átomos de la red. En ese orden, uno de nosotros (Feinberg) y Stephen Ducharme, de la Universidad de California del Sur, encontraron que, cuando un cristal de titanato de bario se calentaba en un ambiente sin oxígeno con el fin de extraer algunos átomos de oxígeno de la red cristalina, sus propiedades fotorrefractivas se alteraban bastante debido a que los huecos dejaban de ser los portadores de cargas dominantes en beneficio de los electrones.

Los investigadores han descubierto que el número de cargas disponibles en los materiales fotorrefractivos aumenta con la concentración de defectos existentes, reforzándose así la intensidad del campo eléctrico interno y de los reticulados del índice de refracción. Pero también esos defectos difunden y absorben la luz de los haces incidentes. Para obtener un número razonable de cargas sin atenuar en demasía la luz incidente, las concentraciones óptimas de defectos van de una a cien partes por millón.

Quizá los mejores materiales fotorrefractivos sean los que se consiguen, con gran esfuerzo, de materiales semiconductores. Stephen E. Ralph, David D. Nolte y Alastair M. Glass, de los laboratorios AT&T Bell, acaban de demostrar que se pueden unir capas muy delgadas de aleaciones de arseniuro de aluminio y galio, de tan sólo algunos átomos de espesor, para formar unas estructuras (conocidas con el nombre de superredes y pozos cuánticos) que exhiben un efecto fotorrefractivo mensurable. Tales materiales, dotados de sorprendentes propiedades eléctricas y elevada velocidad de respuesta, se están ya estudiando. Estos cristales pueden también conducir a una nueva clase de procesadores integrados basados en la óptica y la electrónica.

¿Dónde se apoya la esperanza depositada en los materiales fotorrefractivos para el desarrollo de ordenadores ópticos? En su alta sensibilidad a la luz y en su capacidad para conectar haces luminosos de diferentes láseres y cambiar un esquema de información en otro. El futuro de los materiales fotorrefractivos dependerá de que sus propiedades ópticas puedan controlarse a voluntad con la misma precisión con que hoy se hace en los semiconductores. En principio, los dispositivos fotorrefractivos podrían asociarse con los láseres y detectores de semiconductores para formar un solo dispositivo compacto, capaz de procesar millones de bits de datos simultáneamente cada microsegundo, proporcionando así una velocidad total de procesamiento de billones de bits por segundo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OPTICAL PHASE CONJUGATION IN PHOTOREFRACTIVE MATERIALS. Jack Feinberg en *Optical Phase Conjugation*. Dirigido por R. A. Fisher. Academic Press, 1983.

PHOTOREFRACTIVE NONLINEAR OPTICS. Jack Feinberg en *Physics Today*, vol. 41, n.º 10, págs. 46-52; octubre de 1988.

PHOTOREFRACTIVE MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS I & II: TOPICS IN APPLIED PHYSICS. Vols. 61 y 62. Dirigido por P. Günter y J. P. Huignard. Springer-Verlag, 1988.

NONLINEAR OPTICAL PHASE CONJUGATION. Revista extraordinaria. Dirigido por David M. Pepper. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 25, n.º 3, págs. 312-647; marzo de 1989.

Ciencia y sociedad

El cielo líquido

Bernard Yurke ha superado a William Blake. El poeta inglés del siglo XVIII sólo era capaz de ver el mundo en un grano de arena. Yurke, físico de los laboratorios AT&T Bell, percibe el universo entero en una simple gota de cristal líquido. Yurke se sirve de cristales líquidos, utilizados habitualmente en las pantallas de relojes y calculadoras electrónicas, para simular los "defectos" cósmicos que podrían haber constituido el punto de partida en la formación de las galaxias.

Los cristales líquidos están formados por largas cadenas de moléculas orgánicas con figura de barra. Las moléculas están normalmente orientadas al azar, igual que las de un líquido; pero si se les aplica una presión experimentan una transición de fase, alineándose en la misma dirección, paralelas entre sí, como ocurre con las moléculas de agua cuando se congelan y crean un cristal de hielo.

Señala Yurke que las ecuaciones que describen esta transición de fase son muy parecidas a las ecuaciones que reproducen las transiciones de fase del universo primitivo. Algunos cosmólogos han sugerido que estas transiciones de fase podrían haber dejado en el cosmos ingentes irregularidades, similares a las que surcan el hielo de una charca helada.

Se han propuesto varios defectos cosmológicos: cuerdas cósmicas, que pueden extenderse a lo largo de todo el universo, monopolos magnéticos, esféricos o puntuales, y texturas, que podemos imaginar como nudos del espacio. De acuerdo con los físicos teóricos, estos fenómenos tendrían tanta masa que podrían atraer suficiente materia como para formar galaxias e incluso cúmulos galácticos.

Ninguno de estos objetos se ha visto en el espacio exterior. En 1985 Wojciech H. Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, conjeturó que las cuerdas cósmicas podrían simularse en helio líquido. Nadie reaccionó ante la sugerencia de Zurek, ya que el helio líquido es difícil de manejar y los equipos de refrigeración necesarios son muy costosos.

Yurke, experto en óptica, aunque con un tirón por la cosmología, cayó en la cuenta de que los cristales líquidos podían servir también para simular el cosmos. Se construyó un aparato que consistía en una mínima celdilla de cristal líquido, un dispositivo para aplicar presión, un microscopio y una cámara de vídeo. Las imágenes del proceso de transición de fase muestran el líquido atravesado con líneas entrecruzadas, a las cuales se enganchan las moléculas; estas líneas corresponden a las cuerdas cósmicas. Algunas líneas más gruesas parecen estar pellizcadas hasta un punto; tal sería la representación de los monopolos magnéticos.

Para Neil G. Turok, cosmólogo de la Universidad de Princeton que colabora con Yurke, la analogía entre el cristal líquido y el cosmos tiene sus limitaciones: el cristal líquido no puede simular la expansión del universo y sus defectos se amortiguan debido al rozamiento (no se agitan como un látigo a casi la velocidad de la luz, según suponen algunos teóricos que hacen las cuerdas cósmicas en el vacío del espacio). Turok opina que el experimento de Yurke puede ayudarnos a representar las cuerdas, monopolos y texturas como algo más que entidades matemáticas.

Aunque en sus fases preliminares, la comparación ha proporcionado ya algunas sorpresas. Turok creía que los monopolos eran esferas, no cuerdas pellizcadas. Y si bien suponía que las texturas aparecerían, en el cristal líquido, a modo de tubos, no eran distinguibles a primera vista. Observaciones posteriores sugirieron que probablemente las texturas podrían degenerar rápidamente en pares de monopolos.

Dioxina para los genes

El veneno de unos puede constituir la pasión de otros. Por haber, hay personas a las que les gusta incluso la dioxina. Este grupo de seguidores, reducido y silencioso, ha venido investigando los mecanismos moleculares del compuesto tóxico durante una veintena de años.

Comienzan a entender el retorcido comportamiento de la dioxina en las células; según parece, imita, en su actividad, a las hormonas. Del desciframiento de sus efectos biológicos se beneficiaría la investigación epidemiológica y la relativa a la expresión génica y los genes diana en general.

Hay 75 tipos de dioxinas, pero el examen se ha centrado en la más potente: la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-*p*-dioxina, también denominada TCDD o, simplemente, dioxina. Este compuesto, creado durante la combustión, es residuo contaminante de algunos procesos de fabricación química. Hubo cantidades traza en el defoliante "Agente Naranja", utilizado durante la guerra del Vietnam. Un accidente en la planta química de Seveso, Italia, produjo una contaminación generalizada en 1976.

La denuncia de que el herbicida había dañado a combatientes del Vietnam y a empleados de industrias químicas avivó el interés de la investigación. La experimentación con animales ha demostrado que la TCDD es letal a determinadas dosis y que causa, según la especie afectada, efectos diversos: cáncer, lesiones del timo e hígado, defectos congénitos y depresión del sistema inmune. Se han debatido acaloradamente los estudios epidemiológicos que han encontrado una presencia creciente de sarcoma de tejidos blandos y de linfoma no de Hodgkin en personas expuestas a dioxina; críticas de las que no se han librado tampoco los informes que niegan tales relaciones. Un efecto a largo plazo sobre el hombre, aún sin remedio, es la cloracné: una condición de la piel que a veces desfigura.

Para conocer la actividad biológica de la dioxina necesitamos descubrir en virtud de qué la respuesta depende de la especie afectada. ¿Por qué los hámsters no se inmutan ante una dosis que mata a un conejillo de Indias? ¿Por qué las ratas hembra desarrollan cáncer de hígado tras la inoculación y las ratas macho no?

Los investigadores saben ya que la dioxina opera al enlazarse de forma reversible con un receptor intracelular, que también se une con compuestos similares tales como los bifeniles policlorados (PCB). El receptor es soluble: no se halla ligado a la membrana celular. "Toda la toxicidad [de la TCDD] está mediada por este receptor", explica Alan P. Poland, profesor de oncología en el laboratorio McArdle de investigación del cáncer en la Universidad de Wisconsin en Madison, quien aisló el receptor de la dioxina en 1976. La potencia de las dioxinas o de los PCB es un reflejo directo de su capacidad de enlazarse con dicho receptor; y la

TCDD lo hace con gran avidez, aclara James P. Whitlock, Jr., farmacólogo de la Universidad de Stanford.

El complejo receptor-dioxina se enlaza con el ADN en lo que podría ser uno de los lugares de reconocimiento de la dioxina. Este *locus* es una región reguladora situada en posición superior a la de un gen que determina una enzima de la familia del citocromo P-450. Aunque la dioxina induce la expresión de otros genes, ésa es la respuesta mejor documentada.

La proteína del citocromo P-450 funciona desintoxicando las células. Esa "enzima de eliminación de basuras", como Poland la describe, ayuda a descomponer las grasas; pero el aumento de los niveles de la enzima conduce a la formación de compuestos peligrosos. P-450 parece, pues, un arma de doble filo. Todavía no se han explorado el efecto de la dioxina sobre los niveles de P-450 y sus consecuencias.

A pesar de la capacidad de la dioxina para iniciar el metabolismo de otros muchos compuestos, la TCDD no se degrada. "Ese es uno de los motivos para preocuparse por ella", adelanta Whitlock. La TCDD persiste en el cuerpo, con una vida media estimada en cinco años.

La dioxina podría regular otros genes efectores. Silbergeld y sus colegas, de la Universidad de Maryland, han identificado seis genes, aparte del correspondiente al P-450, cuya expresión está afectada por la dioxina. William F. Greenlee, del Instituto de Toxicología de la Industria Química en Research Triangle Park, ha encontrado rastros de otros dos.

El receptor de la dioxina se ha observado en distintos tipos celulares de muchas especies, entre ellas el hombre y tiburones, lo que sugiere un significado evolutivo. Aunque el receptor varíe de unas especies a otras, los investigadores ven en ello motivo suficiente para explicar la toxicidad variable observada en los animales. Cabría apelar a otros factores, como el ambiente o la constitución genética, capaces de modular el efecto de la TCDD.

La dioxina no parece dañar el ADN. Unida a otras pruebas de laboratorio, esa comprobación induce a pensar que quizá se trate de un promotor del cáncer. Es decir, correspondería a otros factores desencadenar el tumor, en tanto que la TCDD facilitaría su desarrollo. Tal ha sido lo experimentado con animales.

En el laboratorio se ha demostrado también que la TCDD afecta al crecimiento y diferenciación normales de células dérmicas humanas y de otros tejidos, hígado de rata entre ellos. George W. Lucier, bioquímico del Instituto Nacional de las Ciencias Sanitarias Ambientales, ha encontrado que la TCDD produce cáncer en el hígado de rata sólo en presencia de estrógeno. Las hembras desarrollan cáncer después de administrárseles dosis de dioxina, pero las ovariectomizadas y las ratas macho no lo desarrollan, ni siquiera tras dosis "de caballo".

A pesar de las dudas que rodean su intervención en el cáncer, la TCDD llama la atención por su unión con un receptor intracelular específico, fenómeno que se da con muy pocos carcinógenos. Rastrear su pista puede revelar la manera en que los carcinógenos químicos alteran los procesos normales de crecimiento.

Recientemente Whitlock descubrió que la TCDD podía doblar el ADN, una fase potencial en la transcripción génica. "En el tubo de ensayo, la unión del receptor al ADN hace que éste se arquee, distorsionándolo", según Whitlock. Por lo general, el ADN está empaquetado en el núcleo y es difícil llegar a él. Cuando está arqueado, les resulta más accesible a las proteínas implicadas en la expresión génica. "Es como si esta región hubiera dejado abierto un portillo", anota.

Whitlock y otros han determinado la secuencia de siete nucleótidos del lugar donde el complejo receptor de la dioxina se une al ADN (los nucleótidos son las moléculas componentes del ADN). Esta pauta se repite cuatro o cinco veces en la misma región, todas a una distancia de 400 nucleótidos entre sí. Esta repetición "no es un suceso aleatorio", explica Whitlock, apoyando la idea de que el *locus* ha cumplido un propósito evolutivamente rentable.

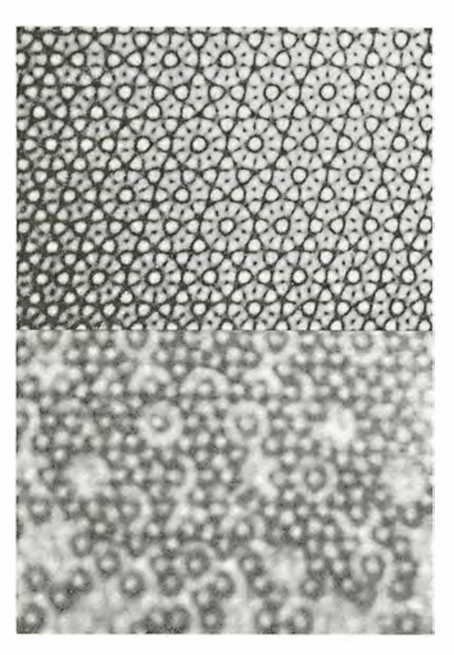
La existencia del receptor y de los lugares de unión ha sugerido a los investigadores que el TCDD puede ser análogo a una hormona. El ajuste "verdadero" del receptor podría ser un compuesto que todavía no se ha descubierto. "El compuesto natural debe ser muy importante", dice Silbergeld, y añade que la dioxina remeda las hormonas en su engarce, reversible, con un receptor proteínico específico.

Pudiera ocurrir, sin embargo, que el receptor no obtuviera ninguna contrapartida fisiológica. "Quizá la respuesta toxicológica sea vestigial", resume Poland para indicar que el receptor se uniría a algo externo que tal vez ya no exista, dejando la P-450 como una respuesta al ambiente. Pero, ¿por qué la supresión inmune o la proliferación celular tendrían que ser desencadenadas por contaminantes ambientales?

Cristales de luz

Egon Spengler solía aconsejar a sus colegas embobados ante la rebaba ectoplásmica: "Si cruzáis los haces positrónicos, la vida que conocéis se detendrá instantáneamente y cada molécula de vuestro cuerpo estallará a la velocidad de la luz." El cruzamiento de haces, que constituía un error fatal en la película "Los cazafantasmas", se ha convertido en poderosa técnica en el Instituto de Ciencias Rowland de Cambridge. Mediante esa operación, los investigadores han creado patrones de luz en los que las partículas microscópicas se organizan y forman cristales insólitos.

Michael M. Burns, Jean-Marc Fournier y Jene A. Golovchenko enfocan de dos a cinco haces láser hacia el fondo de una caja de cristal llena de agua y de esferas de plástico, de escasas micras de diámetro. Los haces láser, de potencia semejante a la de una bombilla corriente, se interfieren entre sí y crean, en el interior de la caja, una figura especial de zonas oscuras e iluminadas. Las esferas emigran de las zonas oscuras y quedan atrapadas en las regiones iluminadas.



1. *CUASICRISTAL* (abajo) *formado por esferas micrométricas, atrapadas en un patrón de luz generado por cinco haces láser* (arriba).

Allí se agrupan para formar materia óptica.

A diferencia de la mayor parte de cristales, cuyos enlaces dependen de la química (intercambio y distribución de electrones), la materia óptica se mantiene unida por la luz (intercambio y distribución de fotones). Por esta razón, los cristales unidos por la luz "pueden considerarse una nueva forma de materia", según publican los investigadores en *Science*.

El primer científico que experimentó el concepto de confinamiento de partículas en campos de luz fue Arthur Ashkin, de los laboratorios Bell, en 1970. Veinte años más tarde, Burns, Fournier y Golovchenko han conseguido, mediante la manipulación de la geometría del haz luminoso, atrapar partículas a escala mucho mayor. Dos haces de láser que interfieren pueden alinear las esferas en filas; tres haces pueden crear una distribución hexagonal.

Con cinco haces, sin embargo, el resultado es un cuasicristal, un estadio intermedio entre los cristales completamente ordenados y los vidrios desordenados. El cuasicristal generado por el equipo de Rowland está constituido por celdillas pentagonales, de forma bastante regular, pero unidas entre sí irregularmente.

La materia óptica se mantiene trabada mientras se mantenga el patrón óptico que la origina, si nadie golpea el aparato. El vigor de las fuerzas ópticas que mantienen unido el cristal centuplica el de las fuerzas del fluido que hacen mover las esferas aleatoriamente en el seno del agua (movimiento browniano). Una esfera atrapada dentro de una región iluminada se comporta como "una canica en un cuenco", ilustra Burns.

Si varias esferas quedan atrapadas dentro de una región brillante, se enlazan entre sí y generan su propia estructura cristalina, efecto que Burns y sus colaboradores no habían previsto. La fuerza de enlace es el resultado de un complicado patrón de luz, que nace cuando la luz que difunden las esferas interfiere con la luz láser sin difundir. La fuerza de enlace es unas 10 o 20 veces más débil que las fuerzas generadas por la figura luminosa original.

Las fuerzas de enlace difieren en diversos aspectos de las que mantienen unidos a los cristales convencionales. En primer lugar, las fuerzas actúan a una distancia mucho mayor que el diámetro de las esferas, mientras que las fuerzas atómicas de los cristales convencionales son de corto alcance. En segundo lugar, las fuerzas ópticas separan las partículas en distancias discretas. En tercer lugar, las fuerzas se generan fuera del cristal, no en su interior. Burns comenta que "las diferentes características de la fuerza, combinadas con el control exterior permiten utilizar a voluntad la materia óptica".

Hasta ahora, los investigadores han podido crear cristales compuestos por cuentas de poliestireno, esferas de dióxido de titanio e incluso con la bacteria *Escherichia coli*. En teoría, la técnica mantiene su validez con cualquier material, siempre que éste difunda la luz. En la práctica, cuando las esferas absorben más luz por un lado que por otro, "las esferas —observa Burns— se convierten en minúsculos proyectiles que vagan fuera de control".

Burns, que se califica a sí mismo de malabarista del láser, manifiesta que su grupo está a punto de producir cristales tridimensionales formados por miles de esferas. Y está dispuesto a usar la técnica para manipular átomos individuales. En muchos laboratorios, los investigadores han aislado átomos en recipientes electromagnéticos y los han enfriado uno a uno frenando su movimiento. Si se pudiera introducir un intenso patrón luminoso en el sistema, los físicos podrían especificar la estructura de un cristal óptico, átomo por átomo.

Dado que la materia óptica cambia de estructura en respuesta a la luz láser, y puesto que esa estructura puede modificar el comportamiento de la luz, Burns espera emplear la materia óptica en interruptores o en conectores de sistemas ópticos. La materia óptica podría también convertirse en cristal permanente endureciendo el medio fluido. Estos cristales servirían de filtros ópticos o rejillas donde se cultivara tejido humano. Podría ocurrir que, cruzando haces, la vida tal como la conocemos hoy pudiera formarse a la velocidad de la luz.

El lenguaje de la danza

Cada campo científico tiene su moscardón. El estudio del emblema de buena organización que es la abeja melífera tiene dos: Adrian M. Wenner, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Patrick H. Wells, de Los Angeles. Durante 25 años ambos han negado con obstinación que las abejas, en su vuelo de retorno tras una exploración feliz, ejecuten danzas complejas para indicar a los demás miembros de la colmena dónde encontrar el alimento. Para dichos investigadores, las abejas se valen sólo del sentido del olfato.

En el bando opuesto militan la inmensa mayoría de etólogos. Numerosos experimentos (algunos de ellos específicamente diseñados para deshacer las objeciones de Wenner y Wells) confirman la existencia de un lenguaje escénico. "Este asunto se resolvió hace mucho tiempo", dice Charles D. Michener, de la Universidad de Kansas. "No conozco a ningún experto que piense de forma distinta."

Pero los dos disidentes, después de más de una década de relativo silencio, han renovado su ataque en un libro: *Anatomía de una controversia: la cuestión del "lenguaje" de las abejas*. No presentan en él nuevas pruebas experimentales contra el lenguaje de la danza, descubierto por el biólogo austríaco Karl von Frisch en la década de los cuarenta. Se limitan a pasar revista a la historia de su desafío, e intentan demostrar que se ha rechazado por razones sociales y políticas y no por razones científicas.

Por desgracia para Wenner y Wells, mientras ellos escribían su libro, otros estaban realizando más investigaciones sobre las abejas melíferas. Un grupo europeo acaba de conseguir un objetivo por mucho tiempo anhelado: construir una abeja robot cuyos movimientos dirigirían las abejas reales hacia lugares específicos. Wenner y Wells sólo tuvieron tiempo de referirse a los experimentos de la abeja robot en un *addendum* a su libro: como han hecho en el pasado, acusan a los experimentadores de ignorar el viento y otros factores.

Pero Wolfgang H. Kirchner, de la Universidad de Würzburg, uno de los investigadores de la abeja robot, explica que el grupo llevó a cabo experimentos para salir al paso de las objeciones de Wenner. La abeja robot dirigió a las reclutas a lugares separados en un ángulo de 180 grados en dos días sucesivos, durante los cuales el viento soplaba en la misma dirección. "Obtuvimos las mismas cifras en ambos días", dice Kirchner.

Los manuscritos del mar Muerto

Quienes tienen en custodia la mayor parte de los rollos manuscritos del mar Muerto no parece sino que vayan a dar al traste con las reglas de la subsistencia académica. Esos documentos del siglo I d.C., descubiertos en su mayoría a finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta en las cuevas de Qumrán y en otros lugares del desierto de Judea, constituyen el más sonado hallazgo en la historia de la arqueología bíblica. Pero aquellos a quienes se ha confia-

do la tarea de editar la principal colección de tales documentos —conservada en el museo privado Rockefeller, en Jerusalén oriental— no han publicado aún ni la mitad de lo hallado durante los 30 o 40 años que llevan con el encargo.

El interés de los rollos del mar Muerto reside en su contenido: se trata de los manuscritos más antiguos, con mucho, de varios libros del Antiguo Testamento, y con seguridad son los únicos textos que reflejan el pensamiento judío durante el período de formación del judaísmo rabínico y del cristianismo primitivo. "Yo estoy publicando una historia de la literatura judía de aquella época y el desconocimiento del contenido de esos rollos hace que esta obra general quede incompleta", se lamenta Geza Vermes, de la Universidad de Oxford. "Cualquier especialista en este o en otros campos afines aducirá parecidos argumentos."

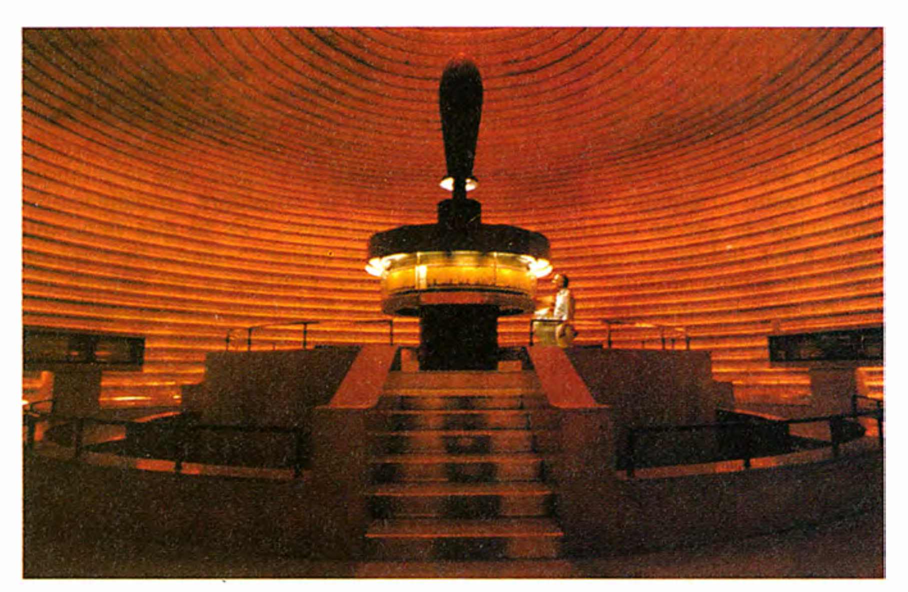
Poco después de su hallazgo, la mayoría de los rollos fueron adquiridos por el Museo Arqueológico de Palestina, al que luego se le daría el nombre de Rockefeller, y quedaron bajo el control de siete expertos designados por el Museo y las sociedades arqueológicas occidentales asociadas a él. Jordania, que se había anexionado Jerusalén y la ribera occidental tras la guerra árabe-israelí de 1948, dio el visto bueno al equipo editor con la condición de que se excluyese de su seno a los judíos —requisito que se burló en alguna ocasión.

Los primeros años del organismo se saldaron con una avalancha de publicaciones. Pero ya a comienzos de la década de los sesenta se estancó en la inactividad. Sin embargo, cuando en la guerra árabe-israelí de 1967 se hizo Israel con el control de Jerusalén oriental, sus autoridades decidieron no intervenir en el equipo inicial ni destituir a su primer editor jefe, un biblista dominico, el Padre Roland de Vaux, a condición de que aceptara que colaborasen en su proyecto varios especialistas judíos.

Hoy día el grupo "tiene una estructura totalmente patriarcal", dice Vermes. Dirige las tareas John Strugnell, de la Escuela de Teología de Harvard, quien se incorporó en el proyecto en 1953, cuando tenía 24 años de edad, se convirtió en su cabeza rectora a comienzos de la década de los ochenta y pasó a ser oficialmente su tercer editor jefe en 1988. Pues bien, como celoso guardián, Strugnell se niega a que se publique lo que él considera investigaciones provisionales. "Es lo que tiene que hacer el editor" —dice— "y mientras no estén publicadas no habrán terminado de llenarse sus lagunas".

Strugnell indica con orgullo que bajo su dirección ha aumentado hasta un total de 65 el número de personas que tienen algún tipo de acceso a los rollos. Pero los enojados especialistas que no pertenecen a tan selecto círculo están librando una batalla cada vez más decidida para obligar al grupo a que publique. Han culpado de los retrasos en la tarea a la incompetencia de los editores, a su pereza, a su prepotencia y a que no quieren reconocer su fracaso. "La cosa dura ya demasiado", se lamenta Vermes.

Uno de los oponentes más duros de Strugnell es Hershel Shanks, editor de la *Biblical Archaeological Review*, popular publicación mensual. Ha dirigido durante cuatro años una cam-



2. LA COPIA MAS ANTIGUA DEL LIBRO DE ISAIAS está expuesta en Jerusalén, en el Santuario del Libro, donde se guarda la parte que Israel posee de los rollos del mar Muerto.

paña para forzar a Strugnell y a sus colegas a que publiquen. "Strugnell es un tipo brillante, pero tiene sus deficiencias", dice Shanks. "Nunca escribió la tesis doctoral, así que no es doctor, y jamás ha escrito un libro. De su propia cosecha ha publicado poquísimas cosas acerca de los rollos del mar Muerto que le están confiados. Su principal contribución fue un largo artículo en el que corrige los errores de otra publicación."

Por primera vez Strugnell ha fijado plazos para la publicación de los documentos, plazos que el año pasado se incumplieron ya y este año se volverán a incumplir otros. Strugnell admite que sus predecesores dejaron que el equipo editor "remoloneara en su trabajo", pero insiste en que las cosas han cambiado desde que él ocupó el cargo. "Ahora estamos a punto de llegar todos a un acuerdo para seguir un plan", asegura.

Contra las acusaciones de desidia se remite Strugnell a la incompatibilidad que suponen las obligaciones académicas de los miembros del equipo editorial, la mayoría de los cuales sólo pueden dedicarse a trabajar en los rollos durante las vacaciones de verano y en los años sabáticos. Dice que jamás se contempló la idea de contratar a un equipo que dedicara todo su tiempo a este trabajo. "Tenga en cuenta que los dos directores que me precedieron eran frailes que habían hecho voto de pobreza" —dice. "Ahora yo tengo justo lo que necesito; y no nos gusta estar en deuda con nadie ajeno al equipo."

Nadie niega que la redacción de unos textos a partir de miles de fragmentos de pergaminos y papiros manuscritos es ardua empresa —en palabras de Frank M. Cross, de Harvard, "el mayor y más complicado rompecabezas del mundo entero". Uno de los rollos, por ejemplo, era de cobre, y hubo de ser cortado en muchos trozos antes de que se pudiese a duras penas desenrollar. Otros rollos tuvieron que recomponerse a partir de pedazos de pergamino, muchos de los cuales sólo alcanzaban a medir pocos centímetros cuadrados.

Hace notar Cross que las 1200 y pico láminas compuestas por el grupo —cada una de ellas una fotografía del material reconstruido conservado entre dos láminas de vidrio— costó 10 años reunirlas. Este trabajo se terminó por el año 1960, pero, según Cross, aún se están encajando fragmentos sueltos. Además, dice, la mayoría de los materiales más fáciles ya han sido dados a conocer. La tarea de transliterar, traducir e interpretar el resto ha sido —asegura— la que de suyo ha llevado más tiempo. "Ahora todo lo que habrá serán láminas con centenares de fragmentos numerados y porciones de espacio en blanco. Unas tiras de encaje será lo que se publique."

La mayor parte del trabajo se realiza sobre las láminas, más que sobre los documentos originales, que están protegidos de los elementos y se pusieron a cubierto de las bombas durante las guerras del Oriente Medio. Israel, por su parte, ha construido refugios a prueba de bomba para la mucho más pequeña colección que alberga en el Santuario del Libro, en Jerusalén. Strugnell se ha asegurado de que facsímiles de sus documentos sobrevivan a cualquier eventualidad, como no sea el apocalipsis final, depositando versiones fotográficas en ocho instituciones de diversos lugares del mundo. Claro está que a las colecciones no tienen acceso quienes no pertenezcan al grupo.

Norman Golb, de la Universidad de Chicago, va más allá que los demás críticos al atribuir algo del retraso de la edición a una deformación profesional de los editores. Sostiene que Strugnell y sus colaboradores se resisten a dar a conocer los documentos en tanto no logren hacerlos encajar en la teoría aceptada: que los rollos fueron escritos por una secta monástica inspirada por los esenios, una de las tres principales facciones religiosas judías del siglo I. Golb propugna la teoría alternativa de que los rollos son una biblioteca no selecta, en la que había obras de diferentes opiniones religiosas, y no un archivo privado, que fueron sacados de Jerusalén para ponerlos a buen recaudo en cuevas del desierto ante la inminencia del asedio tras el que los romanos reducirían a pavesas la ciudad, en el año 70 d.C.

Al decir de Gold, el mismo Strugnell ha reconocido que por lo menos uno de los manuscritos no publicados deja de cuadrar con lo que se creía que eran las opiniones heterodoxas de aquella secta monástica. Sólo que, según dice Golb, Strugnell ha procurado encajar ese manuscrito en la vieja teoría presentándolo como una carta del fundador o de uno de los primeros dirigentes de la presunta secta... una carta tan antigua que las opiniones que expresa sobre la ley judaica y sobre otros asuntos se habrían transformado con el correr del tiempo en las propias de la secta.

En una especie de efusión cordial, dice Strugnell que él y su colaboradora Elisha Qimron, de la Universidad Ben-Gurion, en Berseva, publicarán el próximo año un comentario de 600 páginas sobre tan importante carta (que no tiene más de 112 líneas). Será el primer libro que publique Strugnell sobre lo que él llama el trabajo de su vida.

Aun entonces, puede que continúe el monopolio de los rollos del mar Muerto, si Strugnell se las arregla para adquirir más materiales que los anticuarios retienen como inversión a largo plazo. "Estoy en negociaciones con un kuwaití para la adquisición de un rollo casi completo", dice Strugnell. "Con la guerra en Kuwait, tal vez necesite algún dinero líquido."

Ciencia y empresa

Oído electrónico

Imagínense que un alambre pasa por el interior de una concha de caracol cuyo punto más amplio tiene un milímetro de anchura. El alambre es un electrodo; la espiral ósea, la cóclea del oído interno. ¿Motivo del recorrido? Estimular eléctricamente los nervios auditivos próximos, para que una persona sorda pueda percibir los sonidos. La hipótesis se había propuesto mucho antes de que el Servicio del Control de Alimentos y Productos Farmacéuticos (FDA) aprobara en 1985 el primer implante coclear para uso en adultos. Hay quien se atrevió a afirmar ante la Academia Nacional de Ciencias: "Vamos a cerrar las escuelas para sordos".

Por desgracia, no hubo tal ni hay visos de que suceda. Sólo las personas con pérdida sensorio-neural profunda en ambos oídos, opacas a los audífonos, pueden recibir implantes cocleares. Esta clase de sordera tiene su origen en la lesión de las 12.000 células sensoriales pilosas que recubren la cóclea normal y transforman las vibraciones mecánicas de las ondas sonoras en impulsos nerviosos. Los implantes cocleares emplean electrodos que sustituyen a las células pilosas cocleares. Se han implantado ya unos 3000 aparatos, aunque los expertos en audición estiman que más de 250.000 personas podrían beneficiarse de su aplicación. Además, los implantes cocleares han mejorado a lo largo de los últimos cinco años y podrían atraer más candidatos.

Las primeras versiones aprobadas por la FDA captaban el sonido y lo transmitían por inducción eléctrica a través de la piel hasta un electrodo del oído interno. Esos dispositivos de canal único, fabricados por la compañía 3M entre otras, podían ayudar apenas a unos pocos pacientes a comprender las palabras; la mayoría tenía que conformarse con saber que se les estaba hablando. Esos modelos han desaparecido del mercado, observa Bruce J. Gantz, director del centro de investigación de implantes cocleares de la Universidad de Iowa. "Se hizo evidente que los dispositivos multicanal son superiores".

Uno de tales aparatos, un implante de 22 canales construido por Cochlear Corporation, ha logrado la aprobación de la FDA para su aplicación a niños de entre dos y 17 años de edad. Anteriormente, sólo se permitían los implantes en los adultos que habían perdido el oído después de adquirir el habla.

En ese nuevo ingenio, un procesador de palabras alimentado por pilas, que se lleva en el cinturón o en el bolsillo de la camisa, selecciona y cifra ciertas "características" del sonido, desde las bajas frecuencias de las *aes* a las altas de *tsst*. Las señales digitales cifradas se transmiten después a los electrodos implantados en el oído interno por medio de una transmisión de radiofrecuencia.

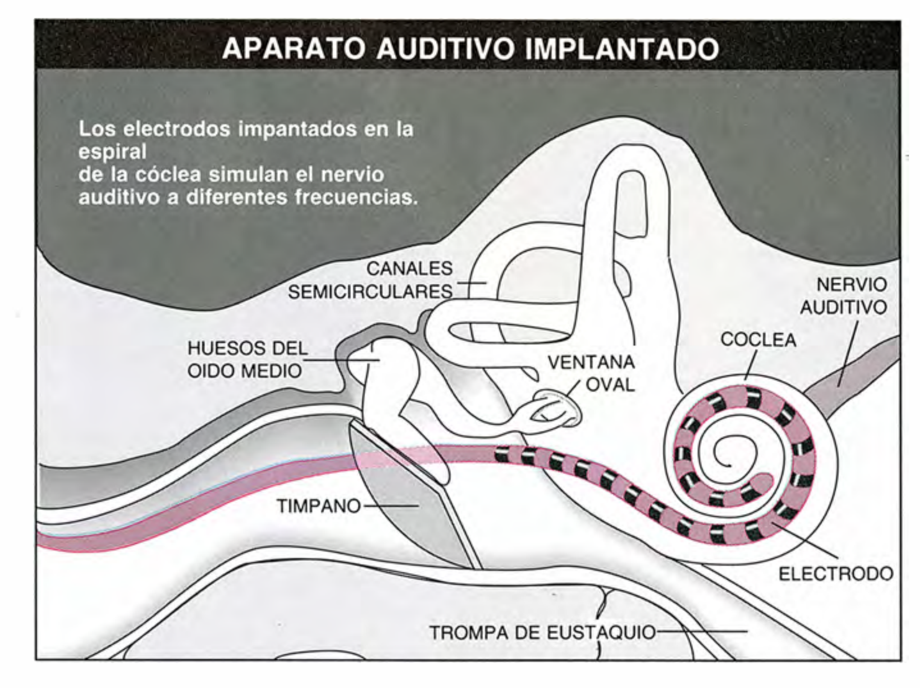
Los modelos futuros incorporarán un número mayor de electrodos. "Los resultados indican que una mayor estimulación es provechosa, aunque no existe una relación lineal", declara Graeme M. Clark, de la Universidad de Melbourne. Clark desarrolló el procesador digital de palabras del aparato de la empresa Cochlear y ha estudiado los implantes cocleares desde 1967. Si una frecuencia particular es muy importante, señala, valdría la pena estimular no sólo uno, sino varios electrodos en una región dada.

Con independencia del número de electrodos, hay un punto en el que los fabricantes no acaban de ponerse de acuerdo: la mejor manera de procesar el sonido. Blake S. Wilson y sus colaboradores, del Instituto Triangle de Investigación y la Universidad de Duke, han desarrollado un procedimiento prometedor. (El trabajo está financiado por el Programa de Prótesis Neurales del Instituto Nacional de la Salud). El método aborda el sonido como constituido por impulsos eléctricos de alta velocidad que no se superponen. "Enviábamos las señales a un máximo de 300 por segundo. Ahora enviamos 1000 por segundo", explica Wilson.

Los pacientes alcanzan mejoras en la comprensión del habla desde el 5 hasta el 162 por ciento cuando se usa este método. Los impulsos rápidos les permiten apreciar los intervalos de la expresión oral, cruciales para la identificación de la mayoría de las consonantes. Para percibir la palabra "pop", por ejemplo, una persona necesita oír los dos silencios entre las p a cada lado de la o.

Para unos pacientes la recepción del sonido pulsado puede resultar más eficaz que para otros. Los que presentan el nervio muy dañado quizá respondan mejor a la transmisión analógica del sonido. La transmisión analógica comprime un amplio dominio de frecuencias y lo circunscribe a un dominio dinámico menor. El sonido se envía en ondas que varían continuamente. No es posible predecir, antes de la operación, la forma en que responderá el paciente a un método dado de conversión de los sonidos; por eso, las empresas mantienen abiertas sus opciones.

"Como nadie se ponía de acuerdo en cómo procesar el sonido, tampoco nosotros nos atrevimos a experimentarlo", dice Joseph H. Shulman, jefe del laboratorio de MiniMed Technologies. La compañía está desarrollando un implante de 16 canales que pue-



de funcionar con procesadores analógicos o digitales, pulsantes o no, en dominios dinámicos grandes o pequeños. Shulman espera que el aparato acometa las preceptivas pruebas clínicas de aquí a unos meses.

En lo mismo labora Smith & Nephew Richards, empresa que se propone combinar el método analógico y el pulsante en un mismo aparato. La compañía posee un implante en fase de prueba clínica, que estimula a la vez cuatro o seis electrodos.

Tan importante como la intensidad del estímulo puede ser el lugar de la cóclea donde se produzca, sugiere Margaret W. Skinner, directora del programa de implantes cocleares de la Facultad de Medicina de la Universidad Washington en San Luis. Uno de los objetivos más deseables —y de los obstáculos más formidables— es el de asignar bandas de frecuencia a los diferentes electrodos, a fin de que las señales lleguen a la región conveniente de la cóclea. Las bajas frecuencias estimulan las regiones más remotas de su interior; las altas estimulan las de la espiral exterior. "¿Dónde se establecen los máximos niveles de beneficio cuando todos los electrodos están funcionando? ¿Deben eliminarse algunos porque quizá entorpezcan la acción? pregunta Skinners.

Los investigadores desean impulsar la implantación en pacientes más jóvenes en la época de la vida en la que el habla se desarrolla rápidamente. Pero, ¿existe una ventana crítica en la que los dispositivos consigan un óptimo rendimiento?

Con ojos de insecto

En los ojos de los seres humanos y de los insectos, la luz se desvía de forma creciente en su propagación a través del tejido. Ello proporciona mayor potencia focal al acortar la distancia a la que convergen los rayos.

Por desgracia, ni las lentes, ni cámaras ni otros instrumentos ópticos operan con tanta perfección. Ello se debe a que las superficies esféricas de esas lentes refractan los rayos luminosos en sus bordes curvados más de lo que lo hacen cerca del centro. Esta aberración esférica crea una imagen borrosa, puesto que no todos los rayos pasan por el foco. El constructor de lentes puede corregirlo puliendo laboriosamente los cristales, de modo que su forma no sea esférica, o añadiendo más lentes, que pueden introducir sus propios y nuevos defectos.

Desde comienzos de siglo, los fabricantes de instrumentos ópticos se han esforzado por imitar los ojos de los insectos: construir lentes con vidrios cuyo índice de refracción varíe a medida que los rayos luminosos se propagan en su interior. Mas lograr tales propiedades de variación del índice requiere potentes ordenadores para llevar a cabo los cálculos.

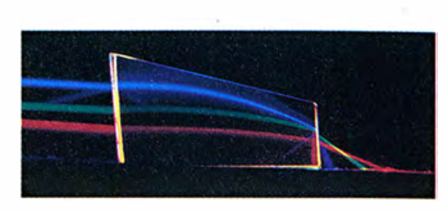
Algunas empresas producen ya lentes GRIN, o de gradiente de índice. Las lentes poseen un índice de refracción que varía desde el centro hacia los bordes, radialmente, desde delante hacia atrás o, por último, en dirección axial. Una lente con gradiente radial proporciona mayor convergencia; permite que la luz llegue al foco a partir de una superficie plana sin pulir. En cambio, una lente con gradiente axial ha de pulirse en forma esférica.

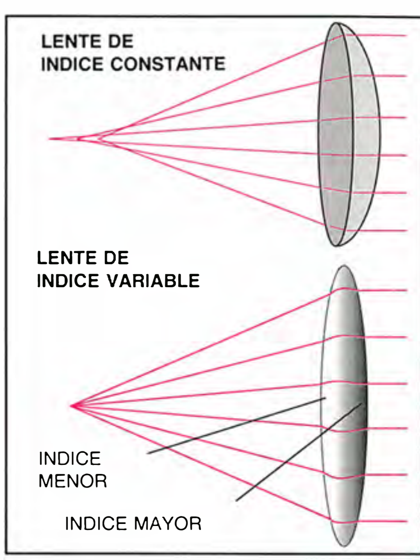
Incluso con la ayuda de los ordenadores, sigue siendo difícil producir los materiales GRIN. La mayoría se elabora empleando un proceso de intercambio iónico, en el cual un ion como el potasio, procedente de un baño de sal fundida, intercambia su lugar con otro metal del vidrio, talio, por ejemplo. En este caso, las regiones con más talio, elemento más pesado, tienen mayor índice de refracción. Puede pasar un mes o más hasta que un número suficiente de iones se difundan en el vidrio; la variación del índice de refracción será siempre limitada.

La empresa Isotec dice haber ideado una técnica de fabricación que produce lentes en cuestión de días duplicando la variación de índice de refracción obtenida hasta ahora. La compañía, que todavía no ha presentado una lente terminada, dice que el proceso proporciona también mayores hornadas y mejor control de la desviación de la luz a través del vidrio. El proceso se realiza fundiendo conjuntamente cinco o diez capas de vidrio que contiene silicato de plomo en un crisol de platino, a temperaturas de hasta 1500 grados Celsius. Las capas con mayor índice de refracción contienen más átomos de plomo, que interactúan vigorosamente con los fotones.

Isotec se creó hace cinco años para dedicarse a la talla de lentes que sirvieran para concentrar los rayos solares sobre células fotovoltaicas. Cuando las primeras muestras del vidrio se rompieron o se volvieron opacas durante la fabricación, la compañía requirió los servicios de Richard Blankenbecler, experto en partículas y director del departamento de física teórica del Acelerador Lineal de Stanford.

Blankenbecler sospechó que el vidrio se desintegraba porque las capas de distinto índice de refracción experimentaban distintas dilataciones o contracciones en respuesta a las variaciones de temperatura. Inspeccionando las especificaciones técnicas de los catálogos de vidrios, halló algunos cuyas propiedades térmicas no cambiaban cuando lo hacía el índice de refracción. Si se usaban esos vidrios, las diferentes capas podrían fundirse conjuntamente sin destruirse.





1. LENTES de índice de refracción variable. Corrigen la aberración de esfericidad y otras, mediante una variación continua del índice de refracción (abajo). *Los rayos que inciden sobre una lente corriente, con índice de refracción fijo* (arriba), *podrían dejar de pasar todos por un punto único, el foco. Los vidrios de gradiente de índice de Isotec* (fotografía), *que se están desarrollando para hacer lentes, pueden desviar la luz independientemente de la longitud de onda o de la curvatura de la superficie.*

Isotec está promocionando ahora su técnica para colimadores de láser, gafas de visión nocturna y el equipo especial que se usa para la "realidad virtual", simulaciones gráficas animadas en tres dimensiones. Pero su intensa campaña de relaciones públicas —que anuncia el producto como "vidrio inteligente" que podría "revolucionar las telecomunicaciones, la informática y los productos ópticos tradicionales"— se ha recibido con escepticismo entre la pequeña comunidad que fabrica productos GRIN.

"Inteligencia implica lógica; y no hay lógica en ello", replica Duncan T. Moore, director del Instituto de Optica de la Universidad de Rochester,

uno de los centros de investigación en GRIN más activos. "Han hecho un trabajo muy interesante, pero yo lo matizaría diciendo que falta todavía mucho antes de llegar a la fase de producción industrial."

Isotec habrá de enfrentarse, en su lucha por el mercado, con Nippon Sheet Glass (NSG). La compañía japonesa cubre el 99 por ciento del mercado, de 50 millones de dólares, de lentes GRIN para facsímiles, fotocopiadoras, impresoras láser y componentes para comunicación por fibra óptica. Usando el proceso convencional de intercambio de iones, NSG produce lentes cilíndricas de diámetro milimétrico, cientos de las cuales se disponen como parte del elemento explorador de una máquina fax o de una fotocopiadora. La corta distancia focal —entre 20 y 30 milímetros— requerida para proyectar una imagen línea por línea de un documento sobre un tambor fotosensible hace adecuadas estas pequeñas lentes para modelos portátiles.

Pero NSG no se conforma con esta técnica. En vez de construir lentes apilando y pegando delgadas varillas con distintos índices de refracción, la compañía ensaya técnicas de fabricación en masa que combinen el intercambio de iones con la fotolitografía empleada para producir microcircuitos de ordenador. Se pretende producir una lente GRIN grabando un conjunto de lentes microscópicas sobre un substrato de vidrio.

Ambas técnicas, sin embargo, pueden resultar rentables en óptica binaria, donde se graban redes difractoras sobre las lentes convencionales para corregir la aberración de esfericidad y otras. De nuevo, los dos métodos pueden resultar complementarios. El Instituto de Optica de Rochester se apresta a combinar ambas técnicas. Lo que, con el tiempo, se llamará óptica ternaria podría conseguir que las aberraciones cromáticas existentes en los materiales GRIN y en los binarios se anulasen entre sí.

¿Microcircuitos biológicos?

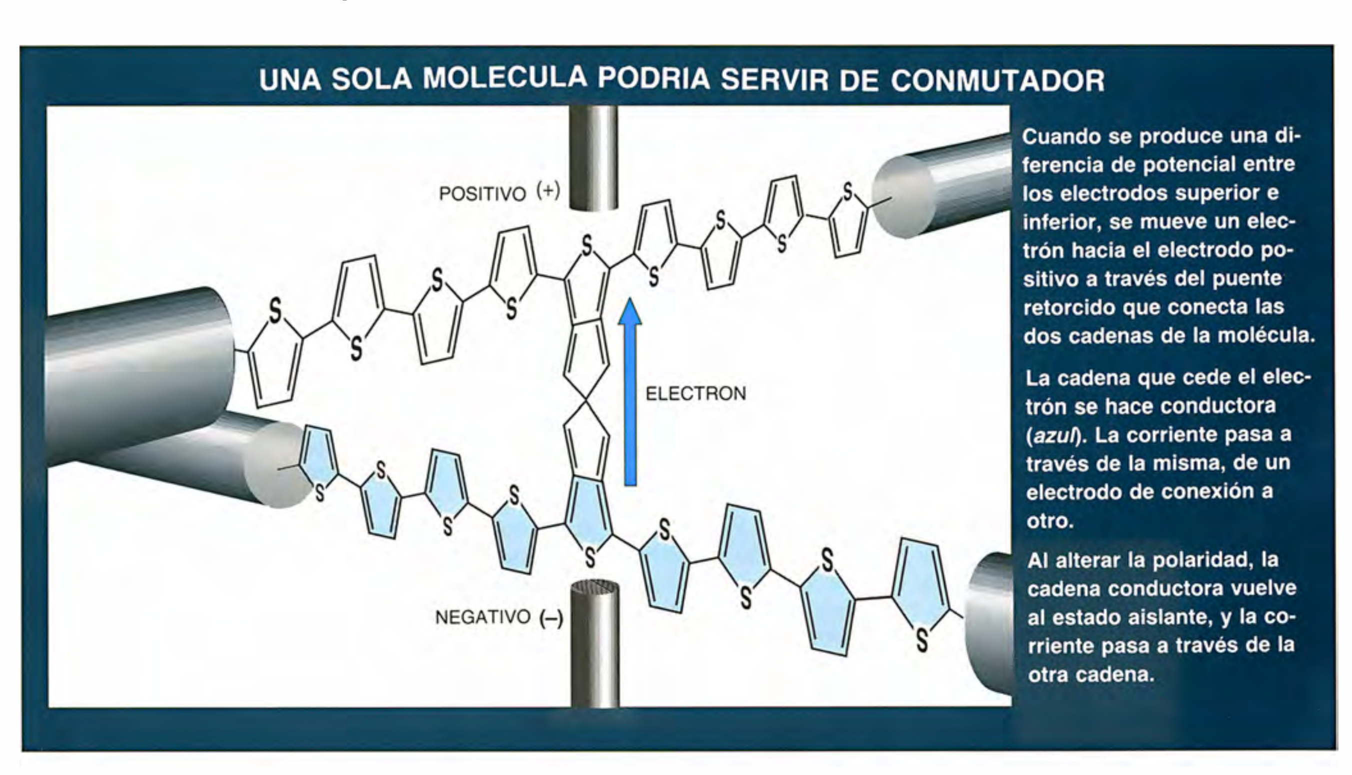
En 1983 se desató la imaginación popular ante las posibilidades de las técnicas de ingeniería genética. Los microorganismos no sólo producirían fármacos en cantidades industriales, sino que podrían también segregar ordenadores. Ensamblarían microcircuitos biológicos ("biochips"): complejos aglomerados de moléculas orgánicas que funcionarían como las pastillas de silicio y serían miles de veces más pequeños que los componentes electrónicos. Así lo pintaba el bulo interesado. Algunos inversores ingenuos se pillaron los dedos antes de que la patraña —y la compañía que la promovía— fuese desenmascarada por un comité científico federal de investigación.

El ridículo consiguiente continúa atenazando el esfuerzo de un grupo de investigadores serios que creen que las moléculas orgánicas pueden convertirse en elementos submicroscópicos de un ordenador real. (Por favor, ruegan, no hablen de "microcircuitos biológicos" para referirse a nuestro trabajo.) Han puesto su empeño en construir moléculas orgánicas que puedan cambiar repetidamente de estado conductor a no conductor y al revés, igual que los componentes electrónicos al uso.

La investigación, que corre paralela al trabajo incesante de miniaturización de los componentes de semiconductores, sigue siendo teórica en su mayor parte. Pasarán años antes de que se pueda comercializar ningún dispositivo electrónico molecular, si es que se logra. Pero los expertos hablan ya de primeros éxitos, que comienzan a hacer tambalear el escepticismo de algunos. "La gente está encantada con la ampliación de la química a nuevas fronteras", dice Robert M. Metzger, de la Universidad de Alabama en Tuscaloosa. "Los físicos nos están animando, y los ingenieros, al menos, ya no se ríen de nosotros".

James M. Tour, de la Universidad de Carolina del Sur en Columbia, anunció este verano que había sintetizado una sección de una molécula capaz de funcionar como un conmutador electrónico. Su esquema de trabajo lo había diseñado en 1988 Ari Aviram, de IBM. Aviram, que comenzó a darle vueltas a la idea de componentes moleculares de ordenador a principios de la década de los setenta, imaginó macromoléculas orgánicas que cedían y aceptaban electrones: que conducían la corriente.

El modelo podría hacer pasar un electrón entre dos cadenas molecula-



Cuando se produce una diferencia de potencial entre los electrodos superior e inferior, se mueve un electrón hacia el electrodo positivo a través del puente retorcido que conecta las dos cadenas de la molécula.

La cadena que cede el electrón se hace conductora (*azul*). La corriente pasa a través de la misma, de un electrodo de conexión a otro.

Al alterar la polaridad, la cadena conductora vuelve al estado aislante, y la corriente pasa a través de la otra cadena.

res. Eso bastaría para generar un conmutador, si el movimiento del electrón se pudiera controlar. La cadena donante del electrón se convertiría en conductora; la que lo había recibido, en aislante. Las cadenas estaban unidas por un puente que franqueaba el paso al electrón.

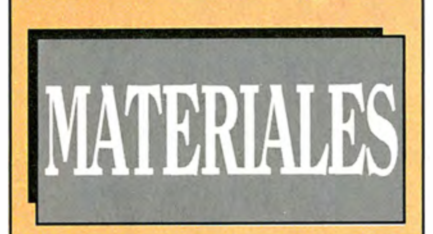
Para evitar que el electrón saltara a voluntad, Aviram giró el puente en un ángulo de 90 grados, de modo que los brazos de la molécula vistos desde arriba dibujaran el signo +. De ese modo, las cadenas estarían separadas entre sí y el electrón pasaría de una a la otra sólo cuando se viera forzado a ello por una tensión aplicada a un electrodo contiguo al puente. La corriente pasaría entonces por los electrodos colocados en cada extremo de la cadena que cedió el electrón, atravesándola.

Tour y dos alumnos de segundo ciclo han realizado un par de versiones de esos puentes retorcidos. En uno, las cadenas se basan en el politiofeno, un polímero conductor que tiene una estructura de moléculas de azufre. "Construimos las cadenas por separado; después enganchamos las piezas". Su procedimiento para sintetizar macromoléculas a medida, tomado de la industria farmacéutica, apenas es conocido, sin embargo, entre los científicos de materiales.

Tour reconoce que la molécula que ha construido es sólo el principio. Después de todos los artificios químicos y de un trabajo intenso, la cadena molecular mide 2,3 nanómetros de longitud, menos de la mitad del tamaño descrito por Aviram.

Pero las moléculas tendrían que ser mucho mayores para poder conectarse con las líneas de los circuitos de las pastillas semiconductoras convencionales. Y se necesitan tales conexiones antes de lograr que unos mil millones de moléculas se conecten entre sí para constituir componentes funcionales de ordenador. Con los métodos comerciales disponibles para grabar pistas conductoras sobre las pastillas semiconductoras, la distancia entre líneas del circuito suele ser de unos 800 nanómetros. Ni siquiera las técnicas más densas de dibujo mediante haces de electrones consiguen acercar las líneas a menos de 15 nanómetros. Para unir esos diminutos conductores, la molécula tendría que triplicar el tamaño de la postulada por Aviram.

Aviram y los otros defensores de la nueva electrónica suponen que, cuando las moléculas orgánicas estén listas para su uso, las distancias entre componentes de los circuitos no serán tan grandes. Incluso entonces, las moléculas habrán de conectarse de uno u



INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

ha publicado sobre el tema, entre otros, los siguientes artículos:

Comunicaciones ópticas por cables submarinos, Raimundo Díaz de la Iglesia.
Número 117, junio 1986.

Nuevos metales, Bernard H. Kear.
Número 123, diciembre 1986

Nuevas cerámicas, H. Kent Bowen.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos polímeros, Eric Baer.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para el transporte terrestre, W. Dale Compton y Norman Louis A. Girifalco.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la navegación aerospacial, Morris A. Steinberg.
Número 123, diciembre 1986

Nuevos materiales y economía, Joel P. Clark y Merton C. Flemings.
Número 123, diciembre 1986

Materiales para la información y la comunicación, John S. Mayo.
Número 123, diciembre 1986

Electrones balísticos en semiconductores, Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman.
Número 127, abril 1987

Transistores de arseniuro de galio, William R. Fresley.
Número 133, octubre 1987

Fractura del vidrio, Terry A. Michalske y Bruce C. Bunker.
Número 137, febrero 1988

Plásticos que conducen electricidad, Richard B. Kaner y Alan G. MacDiarmid.
Número 139, abril 1988

El dispositivo de efecto cuántico, ¿transistor del mañana?, Robert T. Bate.
Número 140, mayo 1988

otro modo con los "cables" conductores. Una solución posible es construir moléculas que contengan un átomo específico, o una colección de ellos, con afinidad por una substancia determinada.

"Esos grupos funcionales serán importantes para conectar las moléculas", declara Mark S. Wrighton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, quien ofrece un ejemplo de simplificación de la fabricación a través de ese método: puesto que las moléculas que contienen azufre tienen avidez por el oro y los grupos carboxílicos se unen al óxido de aluminio, podría sumergirse un tendido de cables que portara esos metales en una disolución de las moléculas orgánicas y sacarlo con uniones conductoras exactamente donde deberían estar.

Otros investigadores del campo de la electrónica molecular creen que las moléculas solitarias presentan demasiados problemas para resultar viables. "¿Cómo se conecta una molécula sola?", pregunta Metzger. Prefiere, en coherencia, trabajar en dispositivos construidos a partir de películas de una molécula de espesor. Unas capas cuidadosamente dibujadas y colocadas una encima de otra podrían conectarse vertical y horizontalmente, evitando voluminosos cables y aumentando la densidad de la circuitería.

Metzger explica que el quid de la cuestión está en conferir polaridad a las moléculas: dotarlas, por ejemplo, de extremos grasos, para que se alejen del agua y se alineen de la misma manera. Pero no ha dado todavía con la manera de grabar configuraciones en una capa.

Por su delicadeza, las películas monomoleculares son vulnerables a pinchazos y otros defectos. A pesar de ello, los abogados del método sostienen que tales dispositivos serán más robustos que las moléculas únicas. Para aumentar la estabilidad de las películas, algunos las ligan a substratos de polímeros.

Metzger y sus colaboradores han obtenido una película de 12 por 25 centímetros. Se disponen a comprobar que conduce la corriente en una dirección. Luego, habrán de controlar la fabricación para hacer menor el tamaño funcional. "En un par de años, sabremos con seguridad si las películas resultan adecuadas. De ahí a un circuito que funcione pueden transcurrir diez años, quizá", aventura Metzger.

El mismo Aviram reconoce que las moléculas orgánicas solitarias no ofrecerán suficiente seguridad. "Nadie pone en duda que se necesitará la redundancia". Deberá determinarse experimentalmente cuánta redundancia será la precisa. Sin contar con moléculas operativas todavía, los científicos se mueven en el terreno de la intuición. Los críticos indican que cuantas más moléculas se apilen por razón de seguridad de funcionamiento, tanto más se acercarán los sistemas orgánicos al tamaño de los convencionales. Los defensores señalan que ya existe en la naturaleza un modelo de moléculas individuales que se usan para procesado y almacenamiento de datos: el ADN.

Hay quien rastrea en la naturaleza moléculas que conmuten de forma espontánea. En el Centro de Electrónica Molecular de la Universidad neoyorquina de Siracusa, Robert R. Birge emplea rodopsina bacteriana de conmutador para una RAM (memoria de acceso aleatorio) de alta velocidad. Un impulso de luz láser hace que el producto químico cambie de una forma a otra. La substancia, similar al pigmento de la retina del ojo humano, proviene de una bacteria que se encuentra en marismas saladas. "Es un organismo muy antiguo, el único que conozco que puede cambiar de la respiración a la fotosíntesis", observa.

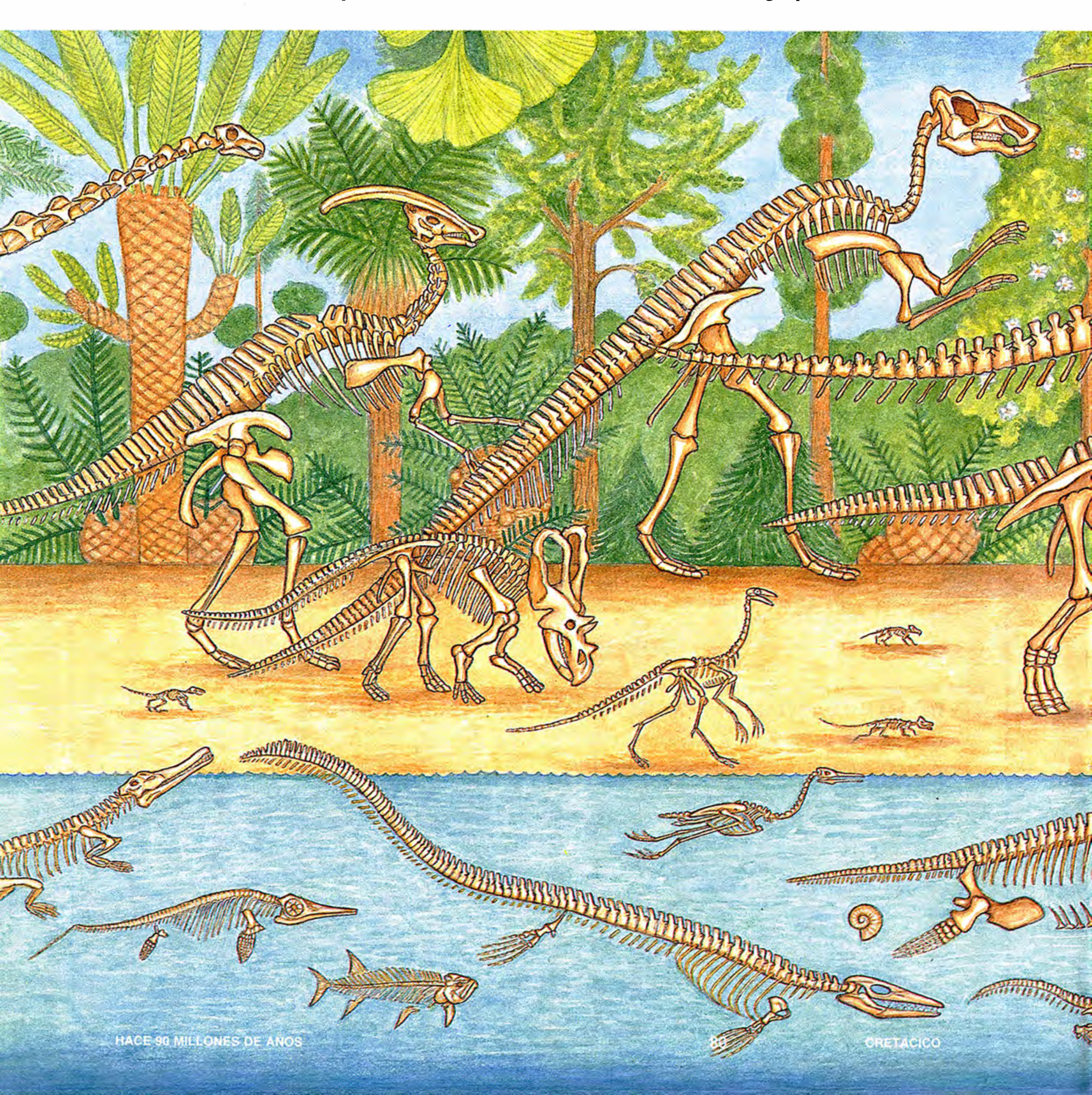
La bien conocida amistad entre el cobre y la electricidad asegura al elemento una plaza en las investigaciones de electrónica molecular. El grupo dirigido por Richard S. Potember, de la Universidad Johns Hopkins, agrega cobre a una fina película de tetracianoquinodimetano (TCNQ), una molécula orgánica. Los impulsos de luz láser o de alta tensión instan el enlace de los átomos de cobre con TCNQ, y su separación, cambiando la película de conductora a no conductora. En el Laboratorio Nacional de Química del Japón se está desarrollando una película similar de TCNQ para la industria. Otro grupo nipón encabezado por Hiroaki Tachibana recurre al calor para activar el conmutador.

Pocos son los investigadores en electrónica molecular que se arriesgan a predecir cuánto se tardará hasta que los dispositivos lleguen a los anaqueles del mercado. Pero todos confían en el progreso de las técnicas implicadas —en particular, la exploración por microscopía electrónica de efecto túnel—, que les están permitiendo observar y construir materiales molécula a molécula. Progresan también las técnicas de fabricación de estructuras que se acercan al tamaño de las macromoléculas.

Causa de la extinción en masa

Hace 65 millones de años el mundo cambió bruscamente. Los reptiles, que hasta entonces habían dominado el panorama, desaparecieron. Lo mismo ocurrió con más de la mitad de todas las especies de plantas y animales, marinos y terrestres. Puesto que una especie puede sobrevivir aun cuando el número de individuos se reduzca de manera importante, el hecho de que al final del período Cretácico (el límite KT) se extinguieran tantas especies sugiere que, por un instante, la Tierra se convirtió en un lugar extremadamente inhóspito.

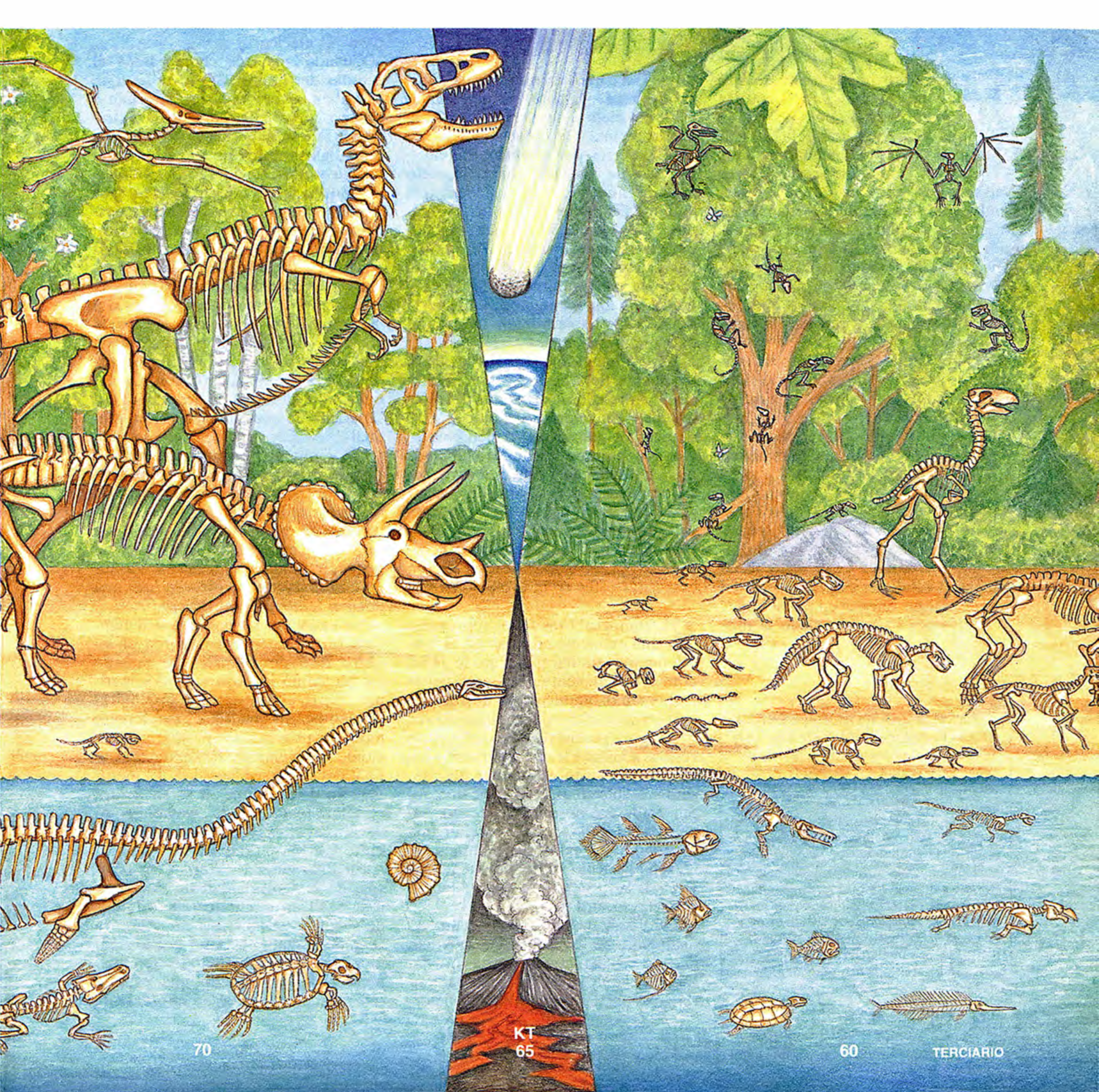
Los mamíferos consiguieron superar los tiempos difíciles. Ocupando los nichos ecológicos que habían dejado vacantes los dinosaurios, se transformaron en el grupo dominante de ani-



males de talla grande. Y, con el tiempo, una de sus especies empezaría a investigar el registro fósil de sus lejanos orígenes.

Ese registro es rico en claves de todas las clases. Además de los huesos de dinosaurios —bastante escasos— hay huellas de muchos organismos más, verbigracia, fósiles micróscopicos de foraminíferos y de otros organismos marinos. El espesor y la composición química de los estratos tienen también una historia que contar.

Sin embargo, el nudo de la historia parece depender de quién la esté leyendo. Walter Alvarez y Frank Asaro, de la Universidad de California en Berkeley, ven huellas del gran impacto de un cuerpo procedente del espacio, escondidas en capas de rocas sedimentarias de los Apeninos italianos o de muchos sitios más repartidos por toda la Tierra. Vincent E. Courtillot, del Instituto de Física del Globo de París, descubre pruebas de un mundo contaminado y arruinado por las ingentes erupciones volcánicas que formaron las mesetas del Deccán ("Deccan Traps"), en la India. En las páginas siguientes nos exponen sus argumentos.



El impacto de un cuerpo extraterrestre

Un cúmulo de pruebas sugieren que un asteroide o un cometa causó la extinción del Cretácico

Walter Alvarez y Frank Asaro

Hace aproximadamente 65 millones de años, algo causó la muerte de la mitad de toda la vida que respiraba sobre la Tierra. Este crimen descomunal eliminó a los dinosaurios, hasta entonces señores indiscutidos del reino animal, y permitió que los humildes mamíferos ocupasen su lugar. Los seres humanos, descendientes de aquellos supervivientes, no pueden evitar preguntarse qué o quién produjo esa mortandad general y qué fue lo que posibilitó que nuestros remotos antepasados sobreviviesen.

En los últimos doce años, investigadores de todo el mundo, procedentes de campos tan dispares como la paleontología o la astrofísica, han empeñado su finura observacional, su destreza experimental y su imaginación teórica, en la respuesta a tales cuestiones. Cuantos hemos estado involucrados, hemos vivido largos meses de laboriosas mediciones, períodos de perplejidad, destellos de intuición y episodios de singular excitación cuando, por fin, las piezas del rompecabezas encajaron en su lugar.

Y creemos haber develado el misterio. Hace unos 65 millones de años, un asteroide gigante, o un cometa, cayó del cielo y se estrelló contra la Tierra a una velocidad de más de 10 kilómetros por segundo. La enorme energía liberada por el impacto acarreó una pesadilla de desastres ambientales, con tormentas, tsunamis, frío y oscuridad, calentamiento por efecto de invernadero, lluvias ácidas y fuegos por doquier. Cuando retornó la tranquilidad, media flora y fauna se había extinguido. La historia de la Tierra había tomado un camino nuevo e inesperado.

Otros elementos sospechosos en la resolución del "caso de los dinosaurios", entre ellos la elevación del nivel del mar, los cambios climáticos y las erupciones volcánicas, tienen coartadas que parecen excluirles. Algunos puntos permanecen, sin embargo, oscuros: ¿dónde se produjo el impacto? ¿Fue éste único o múltiple? ¿Se trata de episodios, los impactos, que ocurrieron de una manera regular y periódica? ¿Qué papel desempeñaron esas catástrofes en la evolución?

WALTER ALVAREZ y FRANK ASARO colaboran desde hace años en la hipótesis del impacto como desencadenante de la extinción en masa. Alvarez enseña geología en la Universidad de California en Berkeley, aunque su laboratorio lo constituyen los montes Apeninos, donde ha sido nombrado ciudadano honorario de Piobbico. Asaro es químico nuclear en el laboratorio Lawrence de Berkeley. Con anterioridad a sus trabajos con Alvarez realizó análisis químicos de materiales arqueológicos; él determinó que una de las más preciadas posesiones de Berkeley, una placa de bronce grabada, que había sido atribuida a Sir Francis Drake, no era auténtica.

El rompecabezas que representa una extinción en masa es, al mismo tiempo, similar y distinto al de un crimen más reciente. Existen pruebas —anomalías químicas, granos de minerales y relaciones isotópicas, en vez de sangre, huellas digitales o cajas de cerillas a las que les falta el trozo donde estaba escrito el nombre del asesino— dispersas por todo el mundo. Sin embargo, no quedan testigos, ni existen posibilidades de obtener una confesión. El paso de millones de años ha destruido o degradado la mayoría de las pruebas del caso, dejando sólo claves sutiles.

Es difícil, incluso, estar seguro de distinguir, de los fósiles que nos han llegado, cuáles pertenecen a las víctimas del impacto. Pero los paleontólogos saben que hubo víctimas, porque el registro fósil que aparece en las rocas sedimentarias muestra, en un nivel correspondiente a hace 65 millones de años, una gran discontinuidad. Dinosaurios o ammonites, que abundaron durante decenas de millones de años, desaparecieron para siempre y de repente. Muchos otros grupos de animales y plantas quedaron diezmados.

La discontinuidad define el límite entre el período Cretácico, durante el cual los dinosaurios dominaron de manera absoluta, y el Terciario, en el que se asistió al desarrollo de los mamíferos. (Es conocido como límite KT, de *Kreide*, la palabra alemana para "Cretácico".)

Cuando nosotros comenzamos el estudio del límite KT, lo único que buscábamos era conocer en cuánto tiempo se había producido la extinción. ¿Fue súbita —unos pocos años o unos siglos— o fue un suceso gradual que tuvo lugar a lo largo de millones de años? La mayoría de los geólogos y paleontólogos habían supuesto desde siempre que la extinción había sido un proceso lento. (En estos campos existe una larga tradición de gradualismo y se sienten incómodos ante la invocación de catástrofes.) Debido a la escasez de fósiles de dinosaurios, la edad de los mismos proporcionaba una información poco precisa acerca de la duración de la extinción. Cabía, pues, la posibilidad de aceptar su desaparición como una extinción gradual.

Sin embargo, cuando los paleontólogos prestaron atención a los fósiles de polen y de foraminíferos, animales marinos unicelulares, encontraron que la extinción había sido muy brusca. En general, los organismos de pequeño tamaño producen fósiles más abundantes y ofrecen así una imagen temporal más precisa.

La extinción se nos muestra también brusca cuando se aborda el registro fósil de animales de tamaño medio, como los invertebrados marinos. Entre ellos están los ammonites (parientes del nautilus, cefalópodo moderno provisto de un caparazón dividido en cámaras), desaparecidos al final del período Cretácico. El mejor registro de su extinción se encuentra en afloramientos de la costa del golfo de Vizcaya, próximos a la frontera entre España y Francia.

En 1986 Peter L. Ward y sus colegas, de la Universidad de Washington, realizaron minuciosos estudios de estos afloramientos en Zumaya (España). Ward encontró que los ammonites parecían extinguirse gradualmente, desapareciendo una especie tras otra a lo largo de un intervalo de

unos 170 metros, en el que están representados cinco millones de años. Pero en 1988 Ward estudió dos secciones próximas, situadas en Francia, y descubrió que las especies de ammonites continuaban existiendo justo hasta el límite KT. La aparente extinción gradual de Zumaya constituía un efecto provocado por un registro fósil incompleto. Si los organismos cuyos fósiles han quedado bien conservados desaparecieron de repente, es probable que otros, como los dinosaurios, que perecieron aproximadamente a la vez, se extinguieran del mismo modo.

Con esto se establece que la extinción fue brusca en términos geológicos, pero no se determina cuántos años necesitó para producirse, ya que el datar una roca con una precisión menor de un millón de años es un problema que entraña gran dificultad. En el registro geológico se pueden determinar con precisión sólo intervalos de hasta 10.000 años (0,01 millones de años), un período más dilatado que la duración total de la civilización humana.

La duración de la extinción masiva que marca el límite KT puede llegar a estimarse con mayor exactitud todavía. En las calizas de aguas profundas que hoy día se encuentran en Gubbio (Italia), existe una delgada capa de arcillas que divide los sedimentos del Cretácico y los del Terciario. La capa, descubierta por Isabella Premoli Silva, de la Universidad de Milán, tiene un espesor de un centímetro. En los años setenta uno de nosotros (Alvarez) formaba parte del grupo que encontró el depósito de arcillas dentro de un paquete de unos seis metros de calizas depositadas durante el período de 0,5 millones de años de inversión de la polaridad magnética denominado 29R. Estos datos sugieren que la capa de arcillas y la extinción en masa que señala representan un intervalo de tiempo de no más de 0,001 millones de años, es decir, unos 1000 años.

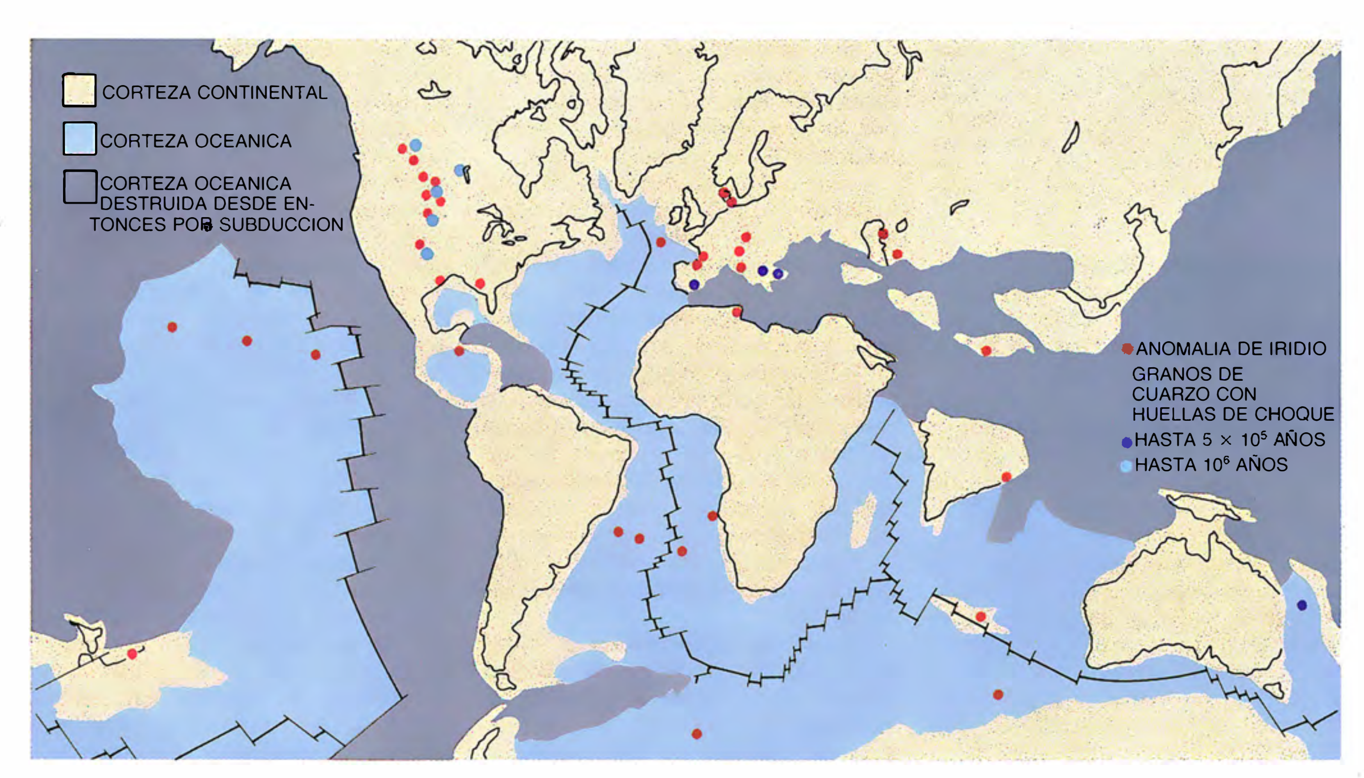
Jan Smit, de la Universidad de Amsterdam, realizó un estudio similar en Caravaca, en el sur de España, donde el registro estratigráfico es incluso más preciso, y estimó que la extinción no duró más de 50 años. ¡Para los patrones de un geólogo esto es algo deslumbradoramente vertiginoso!

Nuestro trabajo sobre el límite KT comenzó a finales de la década de los años setenta, cuando con nuestros colegas de Berkeley Luis W. Alvarez y Helen V. Michel intentábamos desarrollar un método más exacto de determinar cuánto tiempo había tardado en depositarse la capa de arcilla de Gubbio. Nuestros esfuerzos fracasaron, pero proporcionaron la primera clave esencial para establecer la identidad del "asesino general". (Eso es lo que detectives y científicos necesitan: mucho trabajo duro y un golpe de suerte de vez en cuando.)

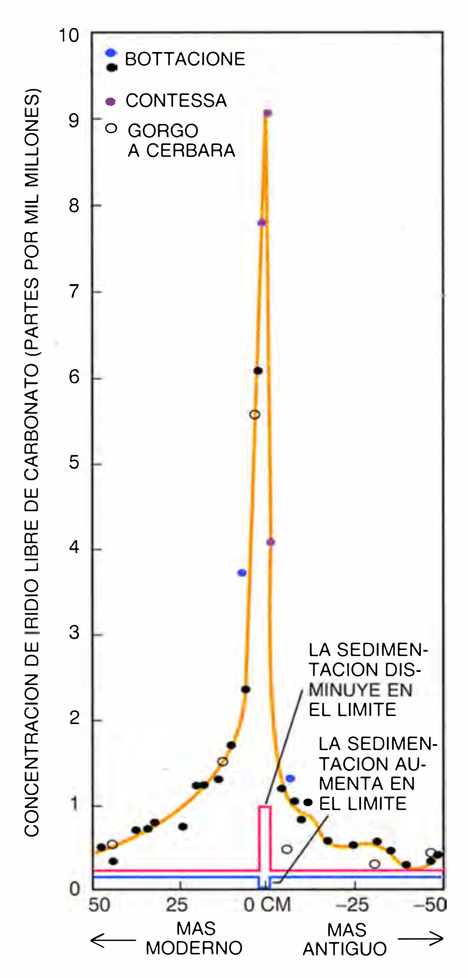
El método se basaba en la escasez de iridio en la corteza terrestre, aproximadamente 0,03 partes por mil millones, frente a las 500 partes por mil millones que aparecen, por ejemplo, en las condritas carbonáceas, un tipo de litometeoritos primitivos. El iridio escasea en la corteza terrestre porque la mayor parte del que existe en el planeta se encuentra confinado en el núcleo, formando aleación con el hierro.

Sospechamos entonces que el iridio que llegaba a los sedimentos oceánicos profundos, como son los de Gubbio, procedía principalmente de la lluvia continua de micrometeoritos o "polvo cósmico", como se la llama a veces. Este aporte continuo proporcionaría una especie de "reloj": cuanto más iridio contuviera una capa, más tiempo habría tardado en acumularse. Además, el iridio podía medirse en concentraciones muy bajas por medio del análisis de activación neutrónica, una técnica en la que el bombardeo de neutrones convierte el metal en radiactivo y, por tanto, en forma detectable.

La hipótesis de partida que nosotros considerábamos suponía que la capa de arcilla del límite KT se había formado a lo largo de un intervalo de



1. PRUEBAS que atribuyen a un gran impacto la causa de la extinción del final del período Cretácico; están repartidas por todo el globo. El mapa muestra la situación de los continentes en la época de la extinción, hace 65 millones de años. Se han hallado niveles anómalos de iridio, lo que sugiere un impacto de grandes dimensiones, en sedimentos del límite Cretácico-Terciario (KT), así como cristales de cuarzo generados por colisión.



2. ANOMALIA DE IRIDIO en sedimentos carbonatados, signo evidente del impacto de un cuerpo extraterrestre. El iridio es raro en la corteza terrestre; solamente un cuerpo procedente del espacio pudo haber depositado la cantidad hallada en el límite KT. Se han sugerido otros modelos de sedimentación (*líneas en color*), en los cuales la tasa de deposición de las calizas varía mientras que la entrada de iridio cósmico permanece constante. Estos modelos no explican la existencia de niveles tan altos de iridio.

unos 10.000 años. En ese tiempo, habrían desaparecido los organismos provistos de concha calcárea y, por esa razón, no se había depositado carbonato cálcico (el principal componente de una caliza). La mayor parte de los estratos de Gubbio contienen alrededor de un 95 por ciento de carbonato cálcico y un 5 por ciento de arcillas, mientras que la capa del límite contiene un 50 por ciento de arcillas. Si esta hipótesis era correcta, la fracción de iridio en las arcillas del límite sería la misma que en las capas inferiores y superiores. Si el depósito de las arcillas se había ralentizado, a la vez que disminuía el depósito de carbonato cálcico, la proporción sería más alta que en las rocas adyacentes.

En junio de 1978 estaban listos los primeros análisis del iridio de Gubbio. Imagínense nuestra sorpresa y confusión al ver que la capa de arcillas del límite y la caliza inmediatamente superior contenían mucho más iridio del que se había previsto en cualquiera de nuestras hipótesis: una cantidad comparable a la que había en todo el resto de la roca depositada durante los 500.000 años del intervalo 29R.

Era claro que esta concentración no podía proceder de la lluvia normal de polvo cósmico. Durante un año deliberamos acerca de las posibles fuentes, probando y rechazando una idea tras otra. Hasta que en 1979 propusimos la única solución que había resistido nuestra criba: un cometa grande, o un asteroide, de cerca de 10 kilómetros de diámetro, había chocado contra la Tierra e introducido una ingente cantidad de iridio en el seno de la atmósfera.

Desde que avanzamos la hipótesis del impacto han surgido a la luz muchos datos confirmando la idea y, así, la mayoría de los científicos que trabajan en este campo están convencidos de que realmente aconteció ese hecho. Más de 100 científicos de 21 laboratorios y 13 países han hallado niveles anormalmente altos de iridio en el límite KT de unos 95 lugares repartidos por todo el mundo. Se ha detectado la anomalía en sedimentos marinos y no marinos, en afloramientos de superficie y en testigos extraídos de los sedimentos oceánicos. Nosotros mismos hemos analizado un número suficiente de otros sedimentos para poder confirmar que las anomalías de iridio son escasísimas. Y, por lo que conocemos, la anomalía del límite KT es fenómeno único.

La anomalía de iridio queda bien explicada por el impacto, ya que la razón entre iridio y elementos de comportamiento químico similar, como el platino, osmio, rutenio, rodio y oro, es la misma en la capa del límite que en los meteoritos. Miriam Kastner, de la Institución Scripps de Oceanografía, ha determinado, trabajando con nuestro grupo, que la proporción de oro a iridio en el límite KT de Stevns Klint (Dinamarca), minuciosamente estudiado, está de acuerdo con la proporción del 5 por ciento que se encuentra en los meteoritos más primitivos (las condritas carbonáceas de tipo I).

Es más, las proporciones de todos los elementos del grupo del platino hallados en el límite KT evidencian un origen extraterrestre. George Bekov, del Instituto de Espectroscopía de Moscú, y uno de nosotros (Asaro) hemos encontrado que la concentración relativa de rutenio, rodio e iridio permite discriminar entre litometeoritos y muestras terrestres. Los análisis realizados en muestras del límite KT procedentes de Stevns Klint, Turkmenia (Unión Soviética) y otras localidades apoyan la hipótesis del impacto.

Lo mismo ocurre con la proporción de isótopos. Jean-Marc Luck, que entonces pertenecía al Instituto de Física del Globo de París, y Karl K. Turekian, de la Universidad de Yale, encontraron que la mayoría del osmio presente en las muestras del límite KT no tenía por qué proceder de un origen continental, ya que la cantidad de osmio 187 es bajísima. La razón de osmio 187 a osmio 186 es más alta en las rocas continentales que en los meteoritos o en el manto terrestre, debido a que aquéllas están enriquecidas en renio, cuyo isótopo radiactivo, renio 187, se desintegra formando osmio 187. El osmio de las muestras KT tiene un origen extraterrestre o procede del manto.

No sólo la composición de las rocas del límite KT abona la idea del impacto. También su mineralogía. En 1981 Smit descubrió otra clave reveladora: esférulas de mineral, de un milímetro de diámetro, existentes en las arcillas KT de Caravaca. (Alessandro Montanari, de Berkely, confirmó su presencia en Italia.) Las esférulas se originaron como diminutas gotas de roca basáltica, fundidas por el impacto, enfriadas rápidamente durante el vuelo balístico hacia la atmósfera exterior y más tarde alteradas químicamente en la arcilla del límite. Son el equivalente basáltico de otras esférulas más ricas en sílice, las vítreas tectitas y microtectitas, que se forman en virtud de impactos menores. La composición química de tipo basáltico sugiere que el impacto se produjo sobre corteza oceánica.

Además de las esférulas, Bruce F. Bohor, del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Denver, y Donald M. Triplehorn, de la Universidad de Alaska, también han descubierto granos de cuarzo con huellas de choque. Laboriosos estudios realizados por E. E. Foord, Peter J. Modreski y Glen A. Izett, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, muestran que los granos presentan las múltiples lamelas planares cruzadas —bandas de deformación— sintomáticas de un impacto a alta velocidad. Estos granos sólo se han encontrado en cráteres de impacto, en puntos donde se han realizado pruebas nucleares, en materiales sometidos en laboratorio a colisión extrema y en el límite KT.

Existe un cráter candidato bajo el

glaciar de Manson, en Iowa. Se extiende sobre un lecho de roca rica en cuarzo y su situación resulta apropiada para explicar la medida y la distribución de los granos de cuarzo con huellas de choque. Con sólo 32 kilómetros de diámetro, el cráter, demasiado pequeño, no puede justificar que el cuerpo que lo formó fuese el único responsable de haber causado la extinción. Sin embargo, estudios detallados del cráter muestran que su edad coincide con la del límite KT y, por tanto, probablemente intervino en el misterio.

¿Como podría un impacto dispersar por todo el globo materiales deformados y fundidos? Un asteroide de 10 kilómetros, moviéndose a más de 10 kilómetros por segundo, abriría un enorme agujero en la atmósfera. Cuando chocase contra el suelo, su energía cinética se convertiría en calor, produciendo una explosión no nuclear 10.000 veces más fuerte que la que provocaría el total del arsenal de armas nucleares que existen en el mundo. Algunos restos vaporizados del asteroide y de la roca del suelo inmediato al punto del impacto serían expulsados, vía el agujero, antes de que el aire hubiese tenido tiempo de rellenarlo.

La bola de gas incandescente creada por la explosión también proyectaría materiales fuera de la atmósfera. La nube de fuego de una explosión nuclear realizada en la atmósfera se expande hasta que alcanza la misma presión que la atmósfera circundante, elevándose entonces hasta una altitud en la que su densidad iguala la del aire. En ese punto, generalmente situado a unos 10 kilómetros de altura, el gas se expande lateralmente formando la cabeza de la conocida nube en forma de hongo.

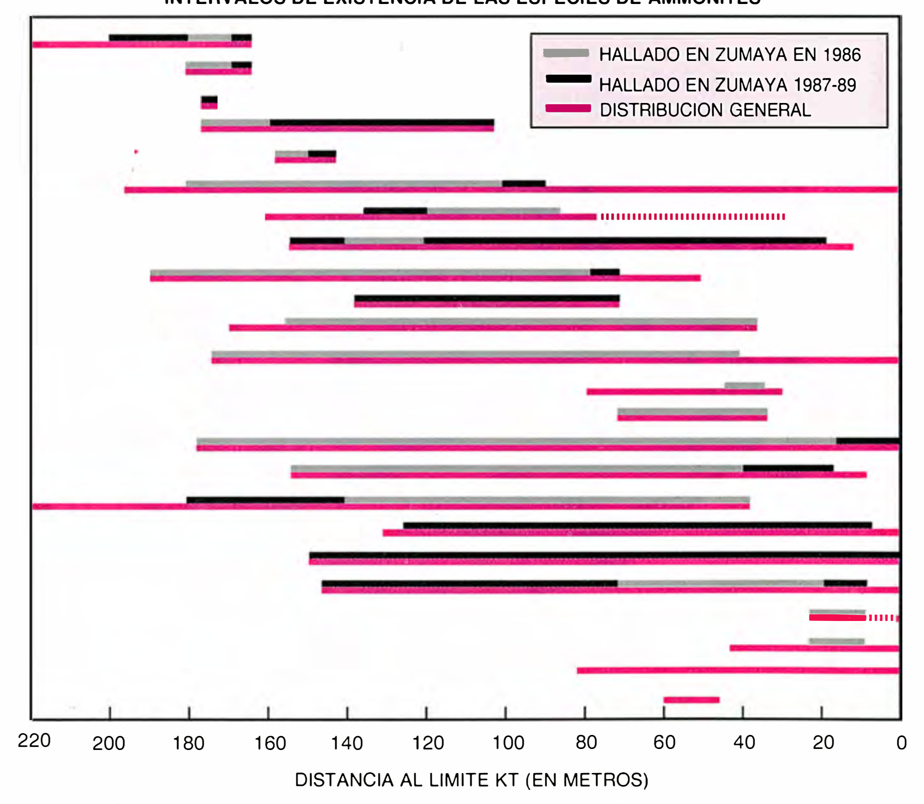
Modelos de explosiones, realizados en computadora, con energía de hasta 1000 megatones —unas 20 veces la energía de la mayor de las bombas nucleares pero sólo 1/100.000 la energía del impacto KT—, han mostrado que la bola incandescente nunca alcanza la presión de equilibrio con la atmósfera circundante. En cambio, a medida que esta bola de fuego se eleva hasta alturas en las que la densidad de la atmósfera disminuye significativamente, su ascensión se acelera y el gas abandona la atmósfera a velocidad suficiente para escapar del campo gravitatorio de la Tierra. Una bola de fuego procedente de un impacto, aún mayor, como sería el de un asteroide, atravesaría violentamente los límites de la atmósfera arrastrando con ella cualquier partícula que hubiese incorporado y enviando ese material hasta órbitas que lo llevarían a cualquier lugar de la Tierra.

El impacto sobre la Tierra de un cuerpo del tamaño de un cometa, que crease un cráter de 150 kilómetros de diámetro, acabaría con cualquier forma de vida que hubiese en el entorno de la bola de fuego. Los investigadores intentan comprender los medios por los cuales el impacto podría también desencadenar extinciones globales. Los mecanismos propuestos hablan de oscuridad, frío, lluvia ácida y efecto de invernadero.

En nuestra publicación inicial, proponíamos que el polvo generado por el impacto causó el obscurecimiento global y éste provocó las extinciones. De acuerdo con simulaciones hechas en ordenador, en 1980, por Richard P. Turco, de R&D Asociados, O. Brian Toon, de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio, y sus colegas, el polvo arrojado a la atmósfera por el impacto de un objeto de 10 kilómetros bloquearía de tal modo la luz que, durante meses, uno sería incapaz de ver su propia mano delante de la cara.

Sin luz solar la fotosíntesis de las plantas se detendría. La cadena alimentaria se colapsaría en todas partes. La oscuridad produciría temperaturas bajísimas, una situación calificada como "invierno de impacto". (Después de considerar los efectos del impacto, Turco, Toon y sus colegas continuaron estudiando el llamado "invierno nuclear", un fenómeno que tiene similitudes con el anterior y es tan capaz de producir extinciones en masa, hoy en día, como lo fue el invierno de impacto hace 65 millones de años.)

En 1981 Cesare Emilliani, de la Universidad de Miami, Eric Krause, de la Universidad de Colorado, y Eugene M. Shoemaker, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, señalaron que un impacto en el océano no sólo arrojaría a la atmósfera partículas de roca, sino también vapor de agua. El vapor permanecería suspendido mucho más tiempo que el polvo, atrapando el calor de la Tierra; de ese modo, al invierno de impacto le seguiría un calentamiento por efecto de invernadero. Más recientemente, John D. O'Keefe y Thomas J. Ahrens, del Instituto de Tecnología de California, han sugerido que el impacto pudo tener lugar en una zona calcárea, liberando grandes volúmenes de dióxido de carbono, otro gas que causaría el efecto de invernadero. Muchos animales y plantas que hubiesen sobrevivido al frío extremo del



3. REGISTRO DE FOSILES MARINOS, testigos del carácter súbito de la extinción del Cretácico. Aunque el estudio de las rocas de algunos afloramientos sugiere una extinción gradual, al considerar el registro fósil en conjunto se ve que virtualmente todas las especies se extinguieron a la vez.

invierno de impacto, habrían muerto a causa del período siguiente de calor no menos extremado.

Mientras tanto, John S. Lewis, G. Hampton, Hyman Hartman y Ronald G. Prinn, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, han calculado que el calor generado en la atmósfera por el choque elevaría las temperaturas hasta niveles que posibilitasen la combinación de oxígeno y nitrógeno del aire. El óxido nitroso resultante podría, con el tiempo, desprenderse del aire en forma de ácido nítrico: una lluvia ácida de verdad. Este mecanismo puede explicar la extinción generalizada de las plantas y animales invertebrados marinos, cuyas conchas de carbonato cálcico son solubles en aguas ácidas.

Otro mecanismo asesino salió a la luz cuando Wendy Wolbach, Ian Gilmore y Edward Anders, de la Universidad de Chicago, descubrieron grandes cantidades de hollín en las arcillas del límite KT. Si la arcilla se había depositado en unos pocos años a lo más, la cantidad de hollín en el límite indicaría una combustión súbita de la vegetación, equivalente a la mitad de los actuales bosques del mundo. Jay Meos y sus colegas, de la Universidad de Arizona, han calculado que la radiación de infrarrojos, derivada del material que al volver a entrar en la atmósfera se calentaría hasta la incandescencia, pudo haber encendido fuegos por doquier.

Con el tiempo, estudios detallados de los sedimentos del límite KT pueden proporcionar pruebas que apoyen un mecanismo asesino particular. Por ejemplo, los modelos de disolución de las calizas de Italia muestran que, después de la extinción, las aguas del fondo se encontraban acidificadas. Y del trabajo que hemos realizado junto a William Lowrie, de ETH-Zurich, se desprende que esas aguas también cambiaron brevemente de su estado normal oxidante a condiciones reductoras, a causa, quizá, de la muerte en masa de organismos marinos.

La investigación tiene una espina que le impide avanzar con soltura: nadie ha hallado ese cráter de 150 kilómetros que el impacto de un objeto de 10 kilómetros debería haber producido. El cráter podría estar escondido bajo el casquete de hielo de la Antártida, o encontrarse en el 20 por ciento de la superficie de la Tierra que desde entonces se ha consumido en las zonas de subducción que existen en los bordes de las placas oceánicas. Las pruebas concernientes a la localización son contradictorias: las esférulas de basalto que aparecen en la arcilla del límite apuntan a un impacto sobre suelo oceánico, pero los granos de cuarzo con huellas de choque sugieren una colisión en el continente.

En los últimos tiempos ha tomado fuerza una nueva hipótesis: por improbable que pueda parecer, la extinción del límite KT pudo haber sido causada por dos o más impactos casi simultáneos. Shoemaker y Piet Hut, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, han identificado una serie de mecanismos que podrían desencadenar múltiples impactos, ya fuesen en el mismo día o a lo largo de un período de años. Sobre la Tierra, la Luna y otros cuerpos planetarios, se han hallado cráteres dobles y múltiples que sugieren que algunos asteroides pueden estar constituidos por dos o más objetos que están orbitando mutuamente uno alrededor del otro. Por otra parte, la Tierra pudo haber sido alcanzada por dos o más fragmentos grandes del núcleo de un cometa en proceso de rotura.

Si el núcleo disperso de un cometa dejase varios fragmentos grandes en una órbita que cruzase la de la Tierra, podrían haber ocurrido impactos múltiples durante largos períodos de tiempo. Tales impactos también podrían haberse producido al azar si algún otro factor incrementase la media de cometas que existen en el sistema solar interno. Aunque ninguna de estas hipótesis ha vencido a las demás, en conjunto indican que los impactos múltiples no son tan improbables como podría haberse pensado.

La teoría del cometa ha ganado credibilidad desde el descubrimiento de materiales manifiestamente extraterrestres cerca del límite KT. Meixun Zhao y Jeffrey L. Bada, de la Universidad de California en San Diego, analizaron capas de creta situadas justo por encima y por debajo del límite KT en Dinamarca. Han encontrado aminoácidos que no aparecen en los compuestos orgánicos que existen en la Tierra, y sí se hallan en meteoritos del tipo de las condritas carbonáceas. Parece improbable que los aminoácidos resistiesen el calor generado en un gran impacto y, de hecho, no aparecen en el mismo límite KT.

Kevin Zahnle y David Grinspoon, de la NASA, han propuesto que el polvo dejado por un cometa en desintegración pudo estar llegando a la at-



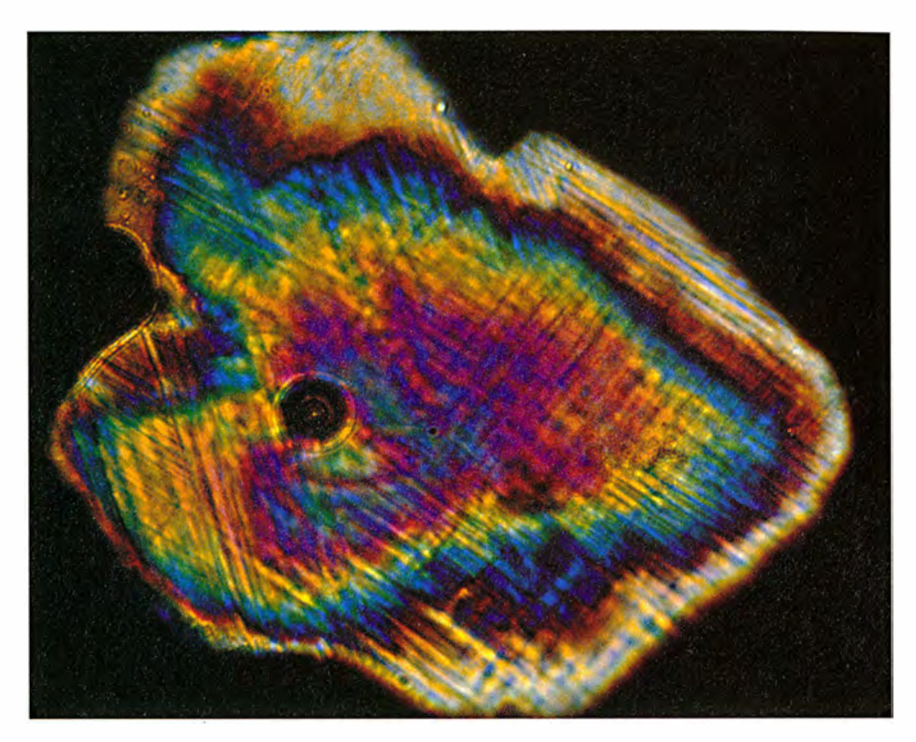
4. ESFERULAS DE BASALTO, incrustadas en arcillas del límite Creticio-Terciario de varias localidades. Las esférulas, ahora alteradas químicamente, corresponden a gotas fundidas de corteza del suelo oceánico, que fueron repartidas y depositadas por todo el globo en virtud del impacto.

mósfera a lo largo de un período de tiempo dilatado, llevando con él estos aminoácidos extraterrestres. En algún momento, dentro de ese intervalo de tiempo, un gran fragmento del cometa habría causado la extinción del límite KT.

Una línea de investigación basada en análisis estadísticos, no químicos, y sin aparente relación con lo anterior, ha tejido una hipótesis explicativa sobre choques periódicos de los cometas contra la Tierra. En 1984 David M. Raup y John J. Sepkoski, Jr., de la Universidad de Chicago, publicaron un análisis del registro fósil que vendría a indicar que las extinciones en masa se habían producido a intervalos de 32 millones de años. Como la mayoría de los científicos que estaban trabajando en el límite KT, nosotros nos mostramos muy escépticos ante esos resultados. Pero el astrofísico Richard A. Muller, de la Universidad de California en Berkeley, reexaminó los datos de Raup y Sepkoski y se convenció de que la periodicidad era real.

Muller, Marc Davis, de Berkeley, y Hut formularon la hipótesis de que una oscura e irreconocible estrella gemela (a la que provisionalmente apodaron Némesis), que orbitase alrededor del Sol cada 32 millones de años, podría alterar periódicamente la órbita de los cometas que existen en el borde externo del sistema solar. La perturbación enviaría a la parte interna del sistema solar una tormenta de cometas de un millón de años de duración, aumentando enormemente la posibilidad de un gran impacto (o de múltiples impactos) sobre la Tierra. Daniel Whitmire, de la Universidad del suroeste de Louisiana, y Albert Jackson, de Computers Science Corporation, propusieron independientemente la misma hipótesis.

Cuando Muller mostró a uno de nosotros (Alvarez) el trabajo en el que postulaba la existencia de Némesis, me mostré muy escéptico. Recuerdo que le dije que yo pensaba que aquello era "una solución ingeniosa para un problema inexistente", ya que las pruebas de Raup y Sepkoski acerca de la periodicidad de las extinciones masivas no me convencían. Si la hipótesis fuese correcta, señalé, los cráteres de impacto de la Tierra mostrarían la misma periodicidad en sus edades. Muller y yo encontramos, para delicia suya y sorpresa mía, que las edades de los cráteres manifestaban la misma periodicidad que las extinciones masivas. Desde entonces he sentido que la hipótesis debía tomarse en consideración, al menos.



5. GRANOS DE CUARZO que muestran deformaciones laminares generadas por colisión a alta velocidad. Cuarzos con esta deformación han sido observados en experimentos de laboratorio, en lugares donde se han realizado pruebas nucleares y en las proximidades de cráteres de impacto.

Resulta, sin embargo, que es muy difícil hallar una estrella roja, de débil brillo y cercana al Sol, cuando el observador no tiene ni idea de por dónde buscar. Muller y Saul Perlmutter, de Berkeley, con un telescopio computarizado, han avanzado ya medio camino en la búsqueda de una estrella con las características de Némesis; esperan terminar en un par de años. Mientras tanto, nuevos análisis de la edad de los cráteres y nuevos datos sobre extinciones han puesto en entredicho la periodicidad postulada. El corto número de episodios y lo incompleto de la información disponible hacen que sea difícil responder inequívocamente a la cuestión.

En la literatura de suspense todo sospechoso de un crimen debe haber tenido medios, motivo y oportunidad. El impacto dispondría, efectivamente, de medios suficientes para causar la extinción del Cretácico; la prueba de que ocurrió justamente en ese momento nos señala la oportunidad. Si no un móvil, la hipótesis del impacto ofrece cuando menos la existencia de un mecanismo asesino. Pero, ¿cómo les va a los otros sospechosos de la matanza de los dinosaurios?

Algunos tienen una coartada sólida: no pueden haber matado a todos los organismos de distinta pertenencia que desaparecieron en el límite KT. Por ejemplo, la respetable opinión de que los mamíferos comían los huevos de los dinosaurios no explica la extinción simultánea de foraminíferos marinos y ammonites.

Stefan Gartner, de la Universidad A&M de Texas, ha sugerido que la vida marina se exterminó con la entrada súbita de un gran flujo de agua dulce procedente del océano Artico. Según parece, durante el Cretácico Superior este océano había quedado aislado de los otros mares y se había llenado de agua dulce. Pero tan ingenioso mecanismo no sirve para explicar la extinción de los dinosaurios o la pérdida de muchas plantas terrestres.

Otros sospechosos podrían haber tenido capacidad para matar, pero poseen coartadas que se basan en el ajuste del tiempo. Así, algunos detectives han intentado atribuir la culpabilidad a cambios en el clima o en el nivel del mar. Sin embargo, para que se produzcan tales cambios se necesita mucho más tiempo que el que representa la extinción; por si fuera poco, no parecen haber coincidido con ella y, además, han ocurrido repetidamente a lo largo de la historia de la Tierra sin que hayan estado acompañados por extinciones.

Hay otros que consideran el vulcanismo sospechoso de primer orden.



6. CRATERES GEMELOS de los lagos Clearwater, en Canadá. Muestran que los episodios de impacto múltiple sobre la Tierra no constituyen la rareza que podría parecer. Dos impactos ocurridos dentro de un corto intervalo de tiempo fueron los responsables de la extinción del Cretácico.

La prueba principal para implicar a los volcanes son las mesetas del Deccán ("Deccan Traps"), una enorme efusión de lavas basálticas que tuvo lugar hace aproximadamente 65 millones de años. Un trabajo reciente sobre paleomagnetismo realizado por Vincent E. Courtillot [véase "Una erupción volcánica", en este mismo número] y sus colegas en París confirma los estudios previos. Muestra que la mayor parte de las mesetas del Deccán se originó como consecuencia de erupciones ocurridas durante un único período de polaridad geomagnética inversa, con ligeros solapamientos con los períodos anterior y siguiente de polaridad normal. El equipo de París ha encontrado que probablemente el intervalo en cuestión es el 29R, episodio durante el cual se produjo la extinción del límite KT, pero también podría corresponder al intervalo de polaridad inversa inmediatamente anterior o posterior al 29R.

Puesto que la efusión de las mesetas del Deccán comenzó en un intervalo de polaridad normal y terminó en el siguiente del mismo signo, las erupciones que dieron origen a esta acumulación de lavas han tenido lugar a lo largo de al menos 0,5 millones de años. Por tanto, la mayoría de los investigadores interesados en extinciones en masa no han considerado que el vulcanismo constituya un sospechoso creíble para un crimen que se cometió, como mucho, en 0,001 millones de años.

Pero algunos investigadores sostienen que, al contrario de lo que sugiere el registro fósil, las extinciones del límite KT se produjeron en un período de muchos miles de años; cabe, pues, que el vulcanismo sea el responsable de los granos de cuarzo, las esférulas y la anomalía de iridio.

En 1983, William H. Zoller y sus colegas, de la Universidad de Maryland en College Park, descubrieron altas concentraciones de iridio en aerosoles procedentes del volcán Kilauea, Hawai, recogidos en filtros situados a 50 kilómetros de distancia. Sin embargo, en los aerosoles la proporción entre el iridio y otros elementos raros es distinta de la que se encuentra en el límite KT. La razón de oro a iridio en los aerosoles del Kilauea multiplica por más de 35 la razón observada en el límite KT de Stevns Klint.

Se ha discutido también la posibilidad o no de que una erupción volcánica produzca granos de cuarzo con huellas de choque. Parece que hay acuerdo en que las erupciones volcánicas pueden producir cierta deformación, si bien las múltiples lamelas que se observan en el cuarzo del límite KT solamente pueden estar formadas por impactos. Por añadidura, John McHone, de la Universidad estatal de Arizona, ha encontrado que contienen estisovita, una forma de cuarzo que se produce exclusivamente a presiones más altas que las que se dan en erupciones volcánicas. Por otra parte, Mark H. Anders, de la Universidad de Columbia, y Michael R. Owen, de la Universidad de St. Lawrence, han usado una técnica conocida como cátodo-luminiscencia (en la que un campo eléctrico hace brillar los granos de cuarzo) para determinar el origen de los granos del límite KT. Los colores que se producen en los granos no son volcánicos; según estos investigadores, los granos habríanse formado por un impacto producido sobre una arenisca ordinaria.

En cualquier caso, las esférulas basálticas del límite KT rechazan un origen por vulcanismo explosivo. Las esférulas podrían haberse generado por una forma más tranquila de vulcanismo, pero entonces no habrían podido dispersarse por todo el globo.

La distribución global de la ano-

malía de iridio, cuarzos con huellas de choque y esférulas basálticas, constituye, tal como se presenta, una prueba sólida que exonera de culpa al vulcanismo y acusa, en cambio, al impacto. Las erupciones tienen lugar en la parte inferior de la atmósfera y, en el mejor de los casos, envían material hasta la alta estratosfera. Las esférulas y los granos de cuarzo, si procediesen de una erupción, serían frenados rápidamente por la resistencia ejercida por la atmósfera y caerían al suelo.

Sin embargo, la enorme erupción que creó las mesetas del Deccán tuvo lugar durante un período que comprende el intervalo en el que se produjo la extinción del límite KT. Es más, representa la mayor efusión de lava sobre tierra que ha tenido lugar en los últimos 250 millones de años (aunque volúmenes aún mayores de lava fluyen sin cesar en las dorsales centro-oceánicas). Ningún investigador puede ignorar una coincidencia semejante.

Parece posible que el impacto desencadenase el vulcanismo de las mesetas del Deccán. A los pocos minutos de la colisión de un gran cuerpo contra la Tierra, el cráter inicial alcanzaría los 40 kilómetros de profundidad; este aumento súbito de presión podría causar la fusión de las rocas, ya a alta temperatura, del manto. Sin embargo, opiniones autorizadas en el tema del origen de las provincias volcánicas encuentran muy difícil dar explicación satisfactoria a un vulcanismo basáltico a gran escala provocado por un episodio de impacto.

En los últimos años el debate entre defensores de una y otra hipótesis se ha radicalizado: los partidarios de la teoría del impacto han tendido a considerar irrelevante la existencia de los "traps" del Deccán, mientras que los defensores de la idea del vulcanismo se esfuerzan por compaginar cualquier señal de impacto con una causa volcánica. Nos movemos en plena dialéctica hegeliana, con una tesis del impacto y una antítesis del vulcanismo, y en busca de una síntesis cuyas grandes líneas todavía permanecen oscuras.

Incluso en su forma actual, sin resolver del todo, el misterio del asesinato en masa del límite KT nos ofrece varias lecciones. El final del siglo XVIII y principios del XIX, cuando el estudio de la Tierra comenzaba a entrar en la vía de la ciencia, fue un período caracterizado por una larga batalla entre catastrofistas (para quienes, en la evolución del planeta, habían tenido un papel crucial grandes sucesos desencadenados de forma súbita) y los uniformitaristas (quienes explicaban la historia mediante cambios graduales).

Steven J. Gould, profesor de paleontología de la Universidad de Harvard e historiador de la disciplina, ha mostrado hasta qué punto los uniformitaristas ganaron la batalla, consiguiendo que generaciones enteras de estudiantes de geología fuesen aleccionados con la idea de que el catastrofismo era algo anticientífico. Sin embargo, como nos muestra la astronomía, el universo es un lugar violento y ahora se va haciendo claro que la Tierra también tuvo sus episodios violentos.

Las pruebas de que un impacto gigante fue el responsable de las extinciones ocurridas al final del Cretácico han devuelto su credibilidad a opiniones catastrofistas. Los futuros geólogos, disfrutando de la libertad intelectual de pensar tanto en términos uniformitaristas como catastrofistas, tendrán una oportunidad de llegar a comprender los procesos y la historia del planeta mejor que la que tuvieron sus predecesores.

Las catástrofes desempeñan también un papel importante en el pensamiento evolutivo. Si un impacto ocurrido hace 65 millones de años eliminó la mitad de la vida que existía sobre la Tierra, entonces la supervivencia de los mejor adaptados no es el único factor que dirige la evolución. Las especies no sólo deben estar bien adaptadas, sino que además deben tener buena suerte.

Si los desastres fortuitos eliminan ocasionalmente grupos enteros de organismos adaptados, entonces la historia de la vida no es algo predeterminado. No hay un progreso inevitable encaminado inexorablemente a la vida inteligente, es decir, a los seres humanos. Es más, Norman Sleep y sus colegas, de la Universidad de Stanford, han sugerido que en los momentos más tempranos de la historia de la Tierra, cuando los impactos eran más frecuentes, la vida incipiente pudo haberse arrasado más de una vez.

Las catástrofes provocadas por los impactos pudieron haber evitado que la evolución quedase atascada. El registro fósil indica que, en tiempos normales, las especies se van haciendo progresivamente más adaptadas a su nicho ecológico particular. Lo que implica que cada vez resulte más difícil, para otra especie, evolucionar dentro de ese nicho.

En virtud de ello, el ritmo de evolución pierde fuerza. Por contra, la supresión generalizada de especies trae una excelente ocasión para que los supervivientes evolucionen hasta ocupar los nichos que han quedado vacantes. (Los recién licenciados comparan esta situación con las excelentes perspectivas de trabajo que se les abrirían si la mitad de todos los profesores con empleo fueran despedidos. Claro que eso ocurre donde la cátedra no es vitalicia.) El registro fósil nos muestra que los ritmos de evolución se aceleraron inmediatamente después del final del Cretácico.

Entre los felices supervivientes de la extinción del límite KT estaban los mamíferos del principio del Terciario, nuestros antepasados. Mientras los dinosaurios dominaron la Tierra, parece que los mamíferos fueron pequeños e insignificantes. Su metabolismo de animales de sangre caliente, su pequeña talla, su gran número y otros rasgos más les facultaron quizá para resistir las severas condiciones impuestas por el impacto; o, simplemente, fue todo cuestión de suerte. Y con la desaparición de escena de los grandes reptiles, los mamíferos comenzaron una fase explosiva de evolución que, andando el tiempo, desembocó en la inteligencia humana. Como detectives que intentan desentrañar un misterio con 65 millones de años de antigüedad, nos encontramos haciendo una pausa y reflexionando sobre un dato: debemos nuestra existencia de seres pensantes al impacto que destruyó a los dinosaurios.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EXTRATERRESTRIAL CAUSE FOR THE CRETACEOUS-TERTIARY EXTINCTION. Luis W. Alvarez, Walter Alvarez, Frank Asaro y Helen V. Michel en *Science*, vol. 208, n.º 4448, págs. 1095-1108; 6 de junio de 1980.

GEOLOGICAL IMPLICATIONS OF IMPACTS OF LARGE ASTEROIDS AND COMETS ON THE EARTH. Dirigido por Leon T. Silver y Peter H. Schultz. *Geological Society of America Special Paper*, vol. 190, 1982.

TOWARD A THEORY OF IMPACT CRISES. W. Alvarez en *Eos*, vol. 67, n.º 35, págs. 649-658; 2 de septiembre de 1986.

NEMESIS AFFAIR: A STORY OF THE DEATH OF DINOSAURS AND THE WAYS OF SCIENCE. David M. Raup. W. W. Norton & Co., 1986.

NEMESIS. R. A. Muller. Weindenfeld and Nicolson, 1988.

GLOBAL CATASTROPHES IN EARTH HISTORY: AN INTERDISCIPLINARY CONFERENCE ON IMPACTS, VOLCANISM, AND MASS MORTALITY. Dirigido por V. L. Sharpton y P. D. Ward. *Geological Society of America Special Paper*, vol. 247 (en prensa).

Una erupción volcánica

¿Qué dramático suceso mató, hace 65 millones de años, a la mayoría de las especies? El autor sostiene que fue una erupción generalizada

Vincent E. Courtillot

La misteriosa extinción en masa que tuvo lugar hace 65 millones de años la atribuyen unos a un impacto de un gran asteroide; otros, a una erupción volcánica. Ambas hipótesis suponen que las nubes de polvo y los cambios químicos que acontecieron en la atmósfera y en los océanos desencadenaron un efecto dominó que erradicó de la Tierra un amplio número de familias vegetales y animales. Las pruebas que aparecen en el registro geológico son, por lo general, compatibles con ambos modelos; el debate principal se ha centrado en cuán rápidamente ocurrieron las cosas. Existen nuevas pruebas que señalan que las extinciones en masa se produjeron a lo largo de decenas o incluso cientos o miles de años. Una duración de este orden se corresponde estrechamente con un episodio de violentas erupciones volcánicas que aconteció en la India en la época de la extinción en masa. Hay, además, otros episodios de extinción que han coincidido bastante con períodos de gran actividad volcánica.

Las divisiones convencionales de la historia geológica reflejan momentos de cambios biológicos y geológicos importantes. La extinción en masa de hace 65 millones de años define el final de la era Mesozoica, durante la cual los reptiles habían gozado de un extraordinario éxito evolutivo, y el comienzo de la era Cenozoica, en la que los mamíferos se hicieron dominantes. A causa de que el último período del Mesozoico es el Cretácico y el primero del Cenozoico es el Terciario, el momento de la extinción en masa más reciente recibe el nombre de límite Cretácico-Terciario, o límite KT.

En ese límite los dinosaurios se despidieron y, lo que resulta incluso más notable, el 90 por ciento de todos los géneros de protozoos y algas desaparecieron. John J. Sepkoski, Jr., y David M. Raup, de la Universidad de Chicago, han llegado a la conclusión de que entre el 60 y el 75 por ciento de todas las especies se extinguieron entonces. Pero lo que reviste parejo interés es que, muchas especies, entre ellas los antepasados del hombre, lograron sobrevivir.

VINCENT E. COURTILLOT ha estudiado distintos fenómenos geológicos; entre ellos, las variaciones del campo magnético terrestre, la deformación y apertura de los continentes y la deriva polar. Enseña geofísica en el Instituto de Física del Globo de París y es director del laboratorio de paleomagnetismo y geodinámica.

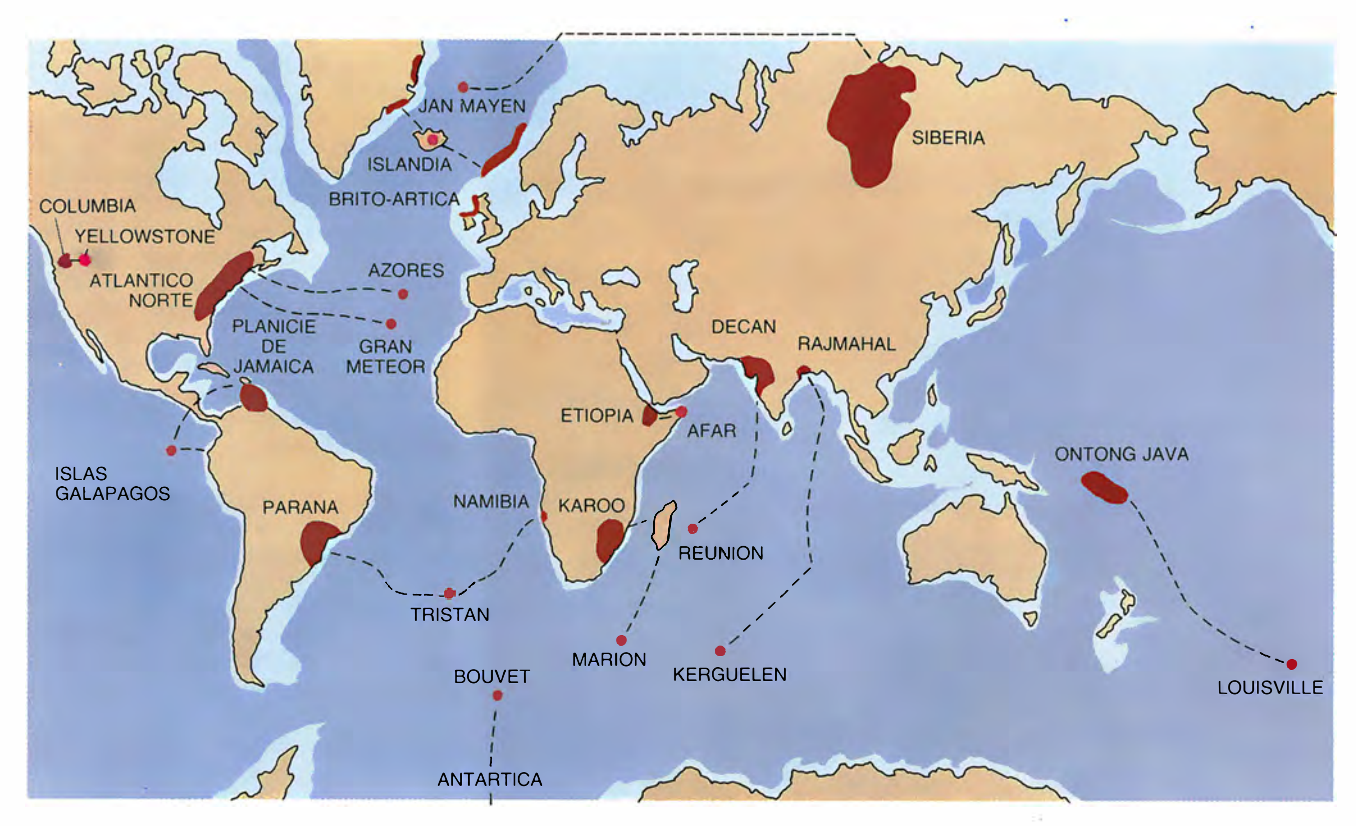
En 1980, Luis W. Alvarez y Walter Alvarez (padre e hijo), de la Universidad de California en Berkeley, junto con sus colegas Franz Asaro y Helen V. Michel, descubrieron concentraciones insólitamente altas del metal iridio —de 10 a 100 veces superiores a los niveles habituales— en rocas pertenecientes al límite KT en Italia, Dinamarca y Nueva Zelanda. El iridio, aunque raro en la corteza terrestre, puede abundar en otras partes del sistema solar. Por tanto, el grupo de Berkeley llegó a la conclusión de que el iridio procedía del espacio exterior. Había nacido la hipótesis del asteroide.

El impacto de un asteroide imponente habría cubierto la Tierra con una nube de polvo, produciendo oscuridad, paralización de la fotosíntesis, colapso de las cadenas alimentarias y, por último, extinción en masa. El iridio se halla en una delgada capa de arcillas cuya composición química difiere de la mostrada por las capas situadas arriba y abajo del límite. La arcilla constituía, a decir del grupo de Alvarez, un depósito de partículas del polvo que levantó el impacto. Según este punto de vista la capa del límite se habría depositado en menos de un año, un suspiro en escala geológica. Otros hallazgos insólitos del límite KT (el más notable de los cuales son los granos de cuarzo que parecen haber estado sometidos a choques físicos fortísimos) admitían explicación en el marco de la hipótesis del impacto de un asteroide.

Frente a ésta, desde hacía tiempo venía fermentándose una hipótesis alternativa. En 1972, Peter R. Vogt, del Laboratorio de Investigación Naval de Washington, D. C., señalaba que, principalmente en la India, había tenido lugar un vulcanismo intenso por la misma época del límite KT. El vulcanismo produjo extensas coladas de lava, conocidas como mesetas o traps del Deccán. (*Deccán* significa "meridional" en sánscrito y *trap* quiere decir "escalera" en holandés). Vogt sugirió la posibilidad de una conexión entre los *traps* y numerosos cambios que tuvieron lugar en las postrimerías del Cretácico.

A mitad de la década de los setenta, Dewey M. McLean, del Instituto Politécnico de Virginia, propuso que los volcanes, al inyectar vastas cantidades de dióxido de carbono en la atmósfera que desencadenarían cambios climáticos bruscos y alterarían la química del océano, podrían haber producido extinciones en masa. Charles B. Officer y Charles L. Drake, del Dartmouth College, analizaron sedimentos procedentes de diversas secciones del límite KT y llegaron a la conclusión de que el enriquecimiento en iridio y otras anomalías químicas que se encuentran en el límite no se produjeron instantáneamente, sino a lo largo de un período de 10.000 a 100.000 años. También afirmaron que las anomalías resultaban más compatibles con un origen volcánico que con otro meteorítico.

La cuantía de tiempo representada en la capa de arcilla del límite KT se convierte en el nudo del debate. No es posible todavía datar una roca de 100 millones de años con una precisión de un uno por mil (es decir, con una precisión menor de 100.000 años). Y buena parte de la discrepancia se centra en determinar si la arcilla del límite se depositó en menos de un año (como sería esperable si procediera de un impacto) o en 10.000 (si dependiera de un dilatado período de vulcanismo).

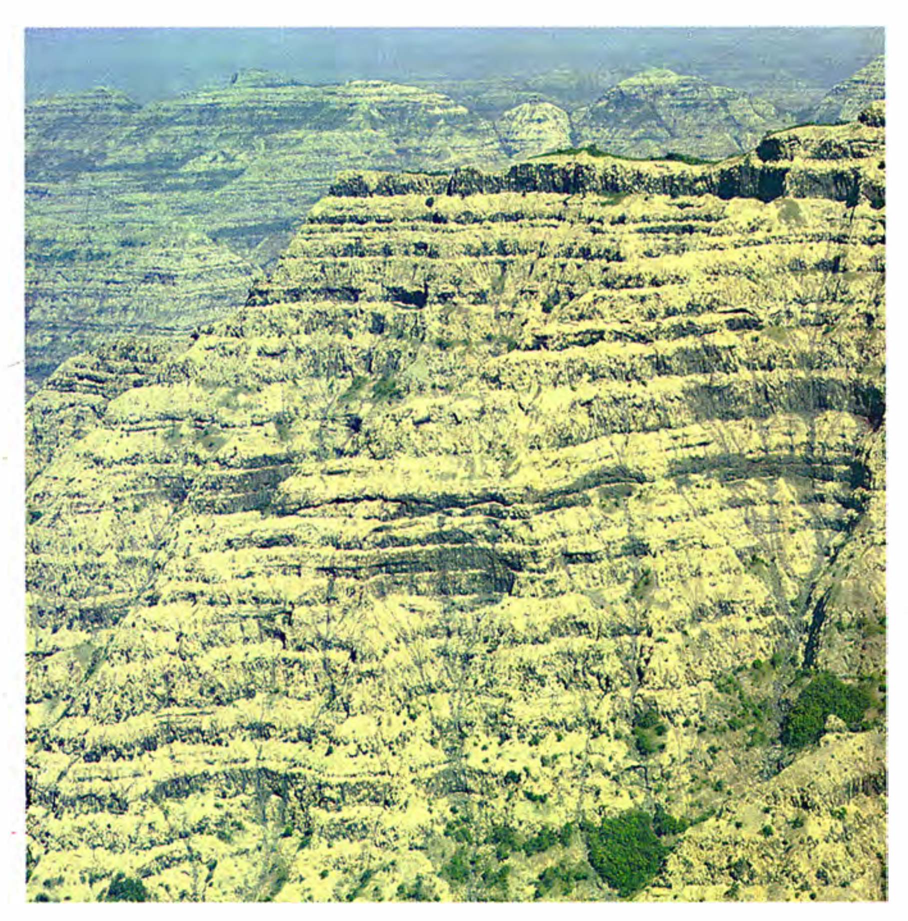


1. EN LAS PROVINCIAS BASALTICAS existen inmensas coladas de lava, que definen regiones donde se produjeron en el pasado catástrofes geológicas. Cada provincia guarda relación con un punto caliente en el manto. Los puntos calientes permanecen bastante fijos y desarrollan en superficie una actividad volcánica que se va desplazando al tiempo que las placas litosféricas se deslizan por encima de dichos lugares.

El mismo tamaño de las mesetas del Deccán sugiere que su formación hubo de constituir un suceso importante de la historia de la Tierra. Una colada de lava puede llegar a tener una extensión de 10.000 kilómetros cuadrados y representar un volumen que supere los 10.000 kilómetros cúbicos; el espesor medio de las coladas es de 10 a 50 metros, aunque alguna vez alcancen los 150 metros. Ahora bien, en la parte occidental de la India, la acumulación de coladas de lava llega a los 2400 metros de espesor (más de la cuarta parte de la altura del monte Everest). Originalmente, las coladas pudieron cubrir más de dos millones de kilómetros cuadrados y el volumen total pudo haber superado los dos millones de kilómetros cúbicos.

EXTINCION EN MASA (Edad aproximada en millones de años)	FLUJO BASALTICO	PUNTO CALIENTE RELACIONADO
MIOCENO MEDIO (14 ± 3)	RIO COLUMBIA (16 ± 1)	YELLOWSTONE
EOCENO SUPERIOR (36 ± 2)	ETIOPIA (35 ± 2)	AFAR
MAASTRICHTIENSE (65 ± 1) LIMITE KT	BRITO-ARTICA (62 ± 2)	ISLANDIA
	MESETAS DEL DECAN (66 ± 2)	REUNION
CENOMANIENSE (91 ± 2)	MONTAÑAS MARINAS DEL PACIFICO ORIENTAL (92 ± 3)	PACIFIC SUPERSWELL
TITHONIENSE (137 ± 7)	PARANA (130 ± 5)	TRISTAN DA CUNHA
	NAMIBIA (135 ± 5)	
PLIENSBACHIENSE (191 ± 3)	KAROO (190 ± 5)	MARION
NORIENSE (211 ± 8)	ATLANTICO NORTE (200 ± 5)	AZORES/ GRAN METEOR
DZHULFIENSE (249 ± 4) LIMITE PT	SIBERIA (250 ± 10)	JAN MAYEN

Una importante cuestión, pendiente de solución hasta hace poco, concernía a la compatibilidad entre la fecha y duración del vulcanismo del Deccán, por un lado, y la edad y espesor del límite KT, por otro. Creíase entonces que las muestras de lava de las mesetas del Deccán tenían una edad comprendida entre 80 y 30 millones de años (estimación realizada a través de la medida de la desintegración de un isótopo radiactivo, el po-



2. MESETAS del Deccán, formadas por coladas de lavas basálticas que se acumularon en una época coincidente con el límite Cretácico-Terciario, cuando tuvo lugar la última extinción en masa.

tasio 40, en las rocas). Si este lapso de tiempo era real o reflejaba un error en las medidas, era algo que se desconocía. Por esta razón, en 1985 sumé mis fuerzas a las de un grupo de colegas para dilucidar la situación.

Teníamos un hilo importante a mano. Las rocas del Deccán eran basaltos, rocas volcánicas ricas en magnesio, titanio y hierro, elementos fuertemente magnéticos. Cuando las lavas basálticas se enfrían, la magnetización de los minúsculos cristales de los óxidos de hierro-titanio de la roca se "congela", alineándose con el campo magnético de la Tierra. La polaridad del campo se invierte de vez en cuando, pasando el polo norte a convertirse en polo sur y viceversa. Estas breves inversiones —de aproximadamente 10.000 años de duración— ocurren de modo fortuito a un ritmo que ha variado, desde aproximadamente una cada millón de años al final del Cretácico, hasta cuatro cada millón de años en tiempos más recientes.

Jean Besse y Didier Vandamme, del Instituto de Física del Globo de París, y yo encontramos que más del 80 por ciento de las muestras de rocas de las mesetas del Deccán pertenecían al mismo intervalo de polaridad inversa. De haberse tratado realmente de un vulcanismo continuo, entre hace 80 millones de años y hace 30, deberíase haber esperado un número aproximadamente igual de muestras con polaridad normal y con polaridad inversa, toda vez que en un intervalo de 50 millones de años se habrían producido decenas de inversiones.

De las secciones que afloran de las mesetas, la más potente (1000 metros de espesor) registra solamente una o dos inversiones. Así, en 1986 llegamos a la conclusión de que el vulcanismo del Deccán comenzó durante un intervalo de actividad magnética normal, alcanzó su punto culminante en el intervalo siguiente de polaridad inversa y acabó durante un intervalo normal. A juzgar por la frecuencia habitual de inversiones, nuestros resultados implicaban que el vulcanismo no podía haber durado mucho más de un millón de años.

Si andábamos en lo cierto, la gama de edades estimada por el método del potasio 40 debía estar equivocada. Mis colegas Henri Maluski, de la Universidad de Montpellier, y Gilbert Féraud, de la Universidad de Niza, junto con otros investigadores, utilizaron otra técnica más nueva y fiable (el método de datación del argón-argón) para determinar cuánto potasio 40 se había desintegrado desde que la roca se formó. Sus resultados confirmaron que las coladas del Deccán se habían originado en un intervalo bastante corto. Las edades que ahora se estiman para las lavas del Deccán quedan comprendidas entre 64 y 68 millones de años; gran parte de la imprecisión que aún se mantiene podría obedecer a la alteración de las muestras u otros factores del tratamiento en el laboratorio.

Aunque sea difícil datar con exactitud una roca sedimentaria, los recientes hallazgos realizados por Ashok Sahni, de la Universidad de Chandigarh, J. J. Jaeger, de la Universidad de Montpellier, y sus colegas, acotan mucho mejor la edad de las mesetas del Deccán. Los sedimentos que se encuentran inmediatamente por debajo de las coladas contienen restos fósiles de dinosaurios que parecen corresponder a formas del piso Maastrichtiense, es decir, de los últimos 8 millones de años del Cretácico. También se han hallado dientes de dinosaurios y mamíferos y fragmentos de huevos de dinosaurios, aparentemente todos de edad Maastrichtiense, en capas de sedimentos que se encuentran intercaladas entre las coladas de lava. Esto implica que el vulcanismo del Deccán comenzó durante la fracción más tardía del Cretácico.

Otros datos más precisos proceden de los pozos petrolíferos situados en la costa oriental de la India. Cortan éstos tres coladas delgadas de mesetas que se encuentran separadas entre sí por una capa de roca sedimentaria. El nivel más bajo de lava se apoya sobre rocas sedimentarias que contienen fósiles de *Abatomphalus mayaroensis*, organismo planctónico que tuvo su momento de máxima expansión durante el último millón de años del Cretácico y se extinguió a continuación. Las capas de rocas sedimentarias intercaladas entre las coladas de lava encierran también fósiles de la misma época; en las capas situadas por encima, sin embargo, tales restos no aparecen ya.

Los fósiles de *A. mayaroensis* están presentes en estratos con polaridad magnética normal situados por debajo del límite KT (por tanto, son anteriores al mismo) y desaparecen justamente en el límite, que está ya situado dentro del siguiente paquete de estratos con polaridad inversa [*véase la figura 5*].

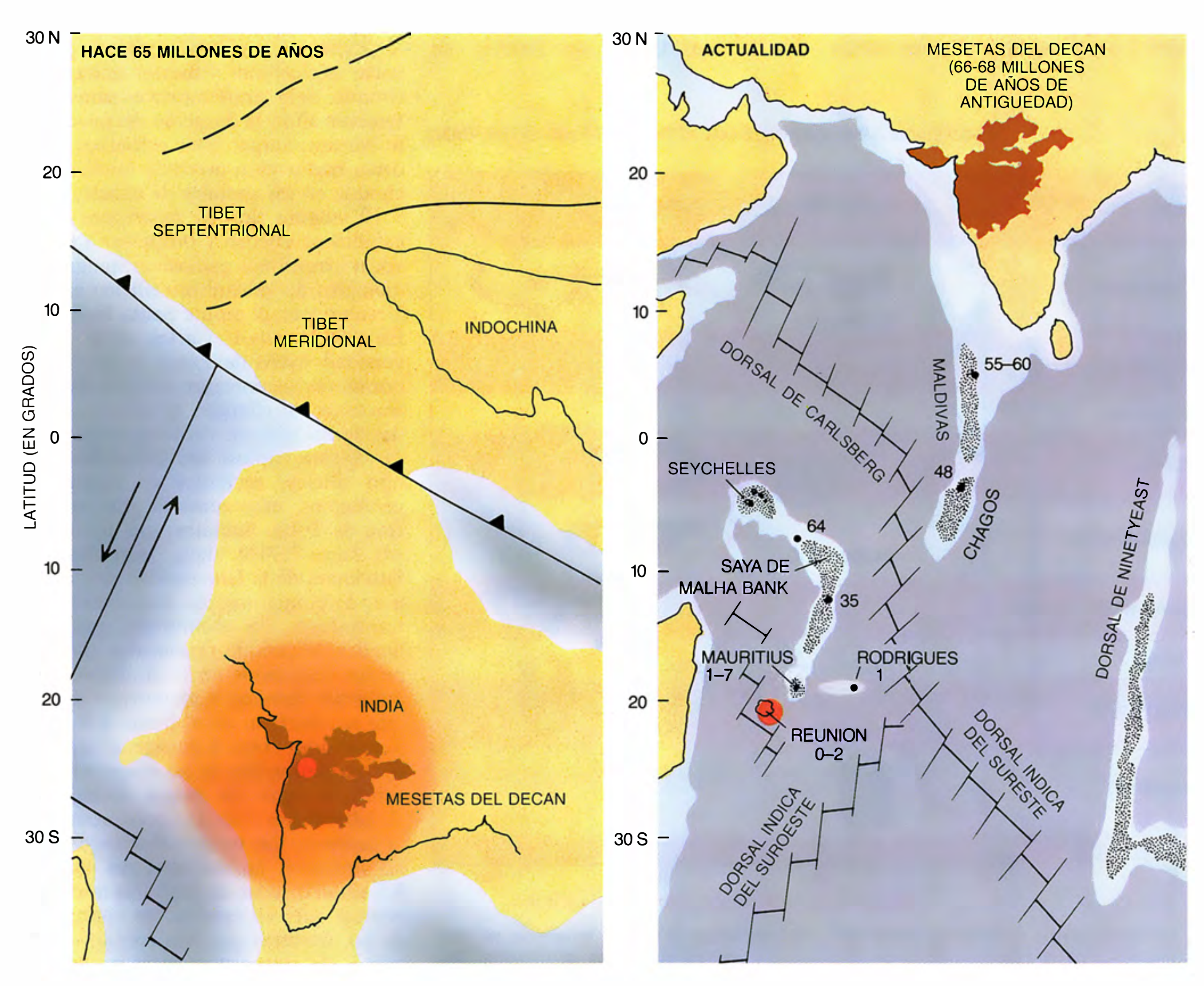
La conclusión más razonable que se obtiene a partir de todos estos datos es que el vulcanismo del Deccán comenzó durante el último intervalo del Cretácico con polaridad magnética normal, alcanzó su punto culminante durante el siguiente intervalo con polaridad inversa (ya en el propio límite Cretácico-Terciario o muy cerca del mismo) y terminó en el primer intervalo con polaridad magnética normal de la era Cenozoica.

Los resultados conjuntos de los estudios paleontológicos y magnéticos reducen la estimación de la duración del vulcanismo del Deccán a unos 500.000 años, la mejor resolución temporal que se ha podido obtener usando las técnicas actuales. El hecho de que el vulcanismo del Deccán —uno de los episodios efusivos más rápidos y de mayor importancia que han ocurrido en los últimos 250 millones de años— coincida con el límite KT, dentro de la mejor estimación posible del tiempo de la que ahora se dispone, nos hace difícil eludir la conclusión de que existió alguna relación entre las mesetas del Deccán y la extinción en masa.

Una vez establecida la simultaneidad aproximada de la efusión de las mesetas del Deccán y de la extinción del final del período Cretácico, encaminamos nuestra siguiente investigación a determinar si una erupción volcánica podía explicar los rasgos observados en las capas del límite KT. En principio, esos rasgos podían haberse producido por el impacto de un asteroide, lo mismo que por una erupción volcánica.

El depósito con una riqueza desproporcionada en iridio que parece haberse formado al mismo tiempo en todo el planeta, no tiene necesariamente que proceder del espacio externo. William H. Zoller, Ilhan Olmez y sus colegas, de la Universidad de Maryland en College Park, descubrieron concentraciones desacostumbradas de iridio en partículas emitidas por el volcán Kilauea, en Hawai. J. P. Toutain y G. Meyer, del Instituto de Física del Globo, hallaron partículas de iridio emitidas por otro volcán, el Piton de la Fournaise en la isla de la Reunión, la cual (como se verá más adelante) guarda relación con el vulcanismo del Deccán. Incrustado en el hielo del casquete antártico se ha encontrado polvo rico en iridio, a miles de kilómetros de los volcanes que lo originaron.

La composición de la arcilla en la capa del límite difiere de la observada en las arcillas situadas por encima y por debajo. El mineral habitual de la arcilla, la ilita, está reemplazado por esmectita, que se puede originar por alteración de rocas basálticas. Estu-



3. PUNTO CALIENTE (del volcán Piton de la Fournaise) situado en la actualidad bajo la isla de Reunión y antes, cuando se acumularon las mesetas del Deccán, bajo la India (*izquierda*), según investigaciones realizadas por el autor. La edad de los montes volcánicos submarinos situados al sur de la India aumenta de manera uniforme desde Reunión hasta el Deccán, el lugar donde se inició esa línea de actividad volcánica (*derecha*).

dios recientes de la composición mineralógica de la arcilla del límite KT en Stevns Klint, Dinamarca, llevaron a W. Crawford Elliot y a sus colaboradores, de la Universidad de Case Western Reserve, y a Birger Schmitz, de la Universidad de Göteborg, a la conclusión según la cual la arcilla constaría de una clase característica de esmectita; de hecho, se trata de una ceniza volcánica alterada.

Puede conseguirse una arcilla semejante a la del límite KT mezclando 10 partes de material procedente de la corteza terrestre con una parte de material tomado de los litometeoritos comunes. Ahora bien, la capa situada bajo la corteza terrestre, el manto, tiene una composición similar a la de los litometeoritos; podría, por tanto, generar las mismas anomalías químicas. Karl K. Turekian, de la Universidad de Yale, y Jean-Marc Luck, que entonces trabajaba en el Instituto de Física del Globo, encontraron que la abundancia relativa de los elementos renio y osmio en la arcilla era similar a la proporción existente tanto en los meteoritos como en el manto.

Los rasgos físicos que distinguen a los materiales del límite KT admiten explicación en el marco de una y otra hipótesis. La capa del límite contiene diminutas esférulas en abundancia. Algunas esférulas están compuestas de minerales arcillosos que parecen proceder de la alteración de gotas de basalto fundido; pero resulta imposible determinar si se originaron como productos volcánicos o a partir de corteza oceánica fundida por el impacto de un asteroide. Las cosas están algo confusas y a ello contribuye el hecho de que algunas esferas correspondían a algas fósiles o incluso huevos de insectos recientes que contaminaron el material.

El descubrimiento, en capas del límite KT, de granos de cuarzo deformados y con huellas de choque, realizado por Bruce F. Bohor y Glen A. Izett, del Servicio Geológico de los Estados Unidos en Denver, se considera a menudo la prueba más sólida en favor de la hipótesis del impacto. Granos con estas características sólo se han encontrado, hasta el momento, en cráteres de conocido origen por impacto (como es el Cráter Meteor, en Arizona) o en lugares donde se han producido explosiones nucleares subterráneas. Son el resultado de un esfuerzo dinámico de choque a una presión 100.000 veces superior a la atmosférica; sin embargo, las estructuras que los caracterizan pueden producirse a presiones mucho menores con tal de que la roca haya sido calentada antes de ocurrir el impacto, como sería el caso de una erupción volcánica.

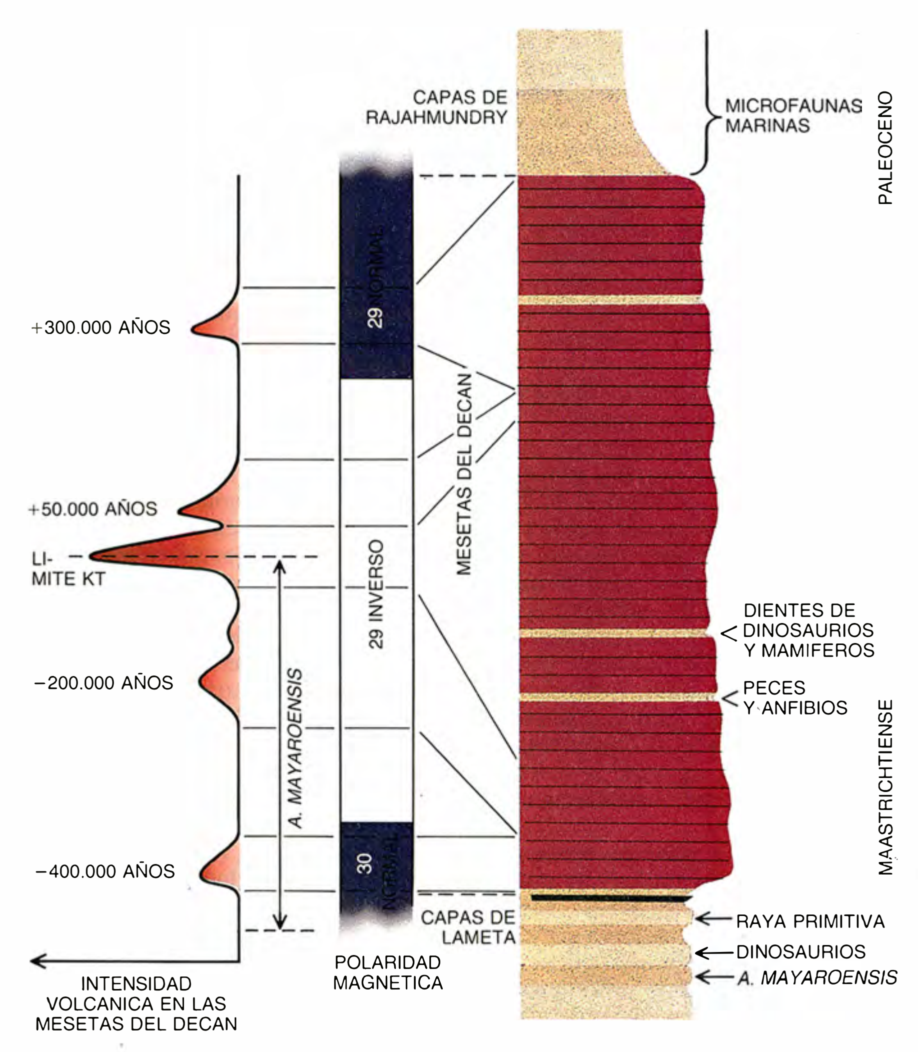
Cuando el magma alcanza la superficie de la Tierra, sufre descompresión y libera gases disueltos. Al propio tiempo, el magma suele enfriarse y apelmazarse. Si el enfriamiento se produce de un modo particularmente rápido, adquiere tal consistencia que los gases no pueden escapar. Por tanto, la presión aumenta, pudiendo provocar explosiones y fuertes ondas de choque. Si la temperatura es suficientemente alta y la duración del proceso lo bastante larga, estos esfuerzos podrían bastar para producir huellas de choque en los cristales de cuarzo.

El magma rico en materiales silicatados es viscoso y propenso a provocar erupciones explosivas; tenemos ejemplos de vulcanismo silícico en el Vesubio y en el monte Santa Helena. En 1986 Neville L. Carter, de la Universidad A&M de Texas, y sus colaboradores encontraron indicios de estructuras de choque, similares a las del límite KT, en rocas procedentes de algunas explosiones volcánicas de tipo silícico, recientes en términos geológicos, tales como la gran erupción de Toba, Sumatra, que tuvo lugar hace 75.000 años. Jean-Claude Doukhan, de la Universidad de Lille, usando el microscopio electrónico de transmisión, ha encontrado que las huellas de choque producidas en impactos realizados en laboratorio, en impactos debidos a meteoritos y las que se observan en el límite KT, difieren todas entre sí en ciertos aspectos; en su opinión, se ha exagerado la similitud entre los rasgos obtenidos en laboratorio y los que presentan los meteoritos. Las huellas de choque de las muestras procedentes del límite KT están orladas de burbujas microscópicas que, en cambio, no aparecen en las muestras que han recibido impactos de meteoritos; estas burbujas parecen indicar una temperatura de formación más alta, lo que sería compatible con un origen volcánico.

4. DIVERSIDAD DE ANIMALES MARINOS y su relación con la tasa de inversiones del campo magnético terrestre (los datos de épocas anteriores a 165 millones de años son aproximados). Destacan dos largos intervalos en los que no se produjeron inversiones: uno, anterior a la extinción del límite Pérmico-Triásico, ocurrida hace 250 millones de años, y el otro anterior a la extinción que hace 65 millones de años tuvo lugar en el límite Cretácico-Terciario. La correlación sugiere que existe una relación causal entre el comportamiento del núcleo terrestre y las extinciones en masa.

El vulcanismo silícico explosivo precede comúnmente a períodos de relativa tranquilidad, en los que surge un vulcanismo de tipo basáltico, como el del Deccán, durante el cual las lavas basálticas fluyen libre y copiosamente. Del 10 al 15 por ciento del volumen de lava de las coladas del Deccán conocido hasta el momento corresponde a vulcanismo silícico explosivo. Una pluma ascendente de magma provocaría la fusión de la corteza continental que le saliera al paso, produciendo los magmas viscosos silícicos (magmas ácidos) que causan el vulcanismo explosivo.

Los rasgos físicos y químicos excepcionales de las capas del límite KT tienen una distribución global. El impacto de un asteroide pudo haber proyectado material hasta la estratosfera, desde donde se repartiría por todo el mundo. Por otra parte, Richard B. Stothers y sus colaboradores, del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA en Greenbelt, Maryland, construyeron un modelo en el que grandes fuentes de lava, como las del Kilauea en Hawai, arrojan polvo y productos piroclásticos. Cuando se pasa a la escala que corresponde a las dimensiones del vulcanismo del Deccán, los modelos predicen que arribarían hasta la estratosfera grandes cantidades de material. La circulación atmósferica distribuiría el material de modo bastante uniforme por los dos hemisferios, sin importar dónde estuviese localizado el foco de emisión.



5. CAPAS DE ROCAS sedimentarias intercaladas entre las coladas de lava del Deccán, en la India. Contienen fragmentos de dinosaurios y otros fósiles del Cretácico, que no aparecen ya en las capas situadas por encima. La extinción en masa tuvo lugar mientras se estaban acumulando las coladas (*derecha*). La historia volcánica que se infiere (*izquierda*) puede explicar las anomalías químicas y las múltiples extinciones en masa que se observan al final del Cretácico. Las inversiones magnéticas ayudan a correlacionar las capas observadas con el comportamiento volcánico supuesto.

Las consecuencias desastrosas que provocaría lo mismo el impacto de un asteroide que el vulcanismo masivo se parecerían bastante. El primer efecto sería la oscuridad, resultado de las grandes cantidades de polvo (levantado por el impacto o correspondiente a cenizas volcánicas) que se elevaría a la atmósfera. La oscuridad interrumpiría la fotosíntesis, causando el colapso de las cadenas alimentarias. En el registro fósil parecen estar reflejadas agresiones ambientales de este calibre. Los organismos de agua dulce resultaron mucho menos afectados que los marinos o los terrestres, debido quizás a que los animales de agua dulce no se alimentan de plantas vasculares (lo que sí ocurre con muchos animales terrestres), ni de plancton fotosintético (una importante fuente de alimento para los vertebrados marinos, que fue diezmada al final del Cretácico).

La vida también habría tenido que hacer frente a lluvias tóxicas, ácidas, a gran escala. El calor generado por un gran impacto habría desencadenado reacciones químicas en la atmósfera que, a su vez, producirían ácido nítrico. En la hipótesis alternativa, las erupciones volcánicas habrían emitido azufre que en el aire formaría ácido sulfúrico. Los efectos ambientales de un vulcanismo rico en azufre son importantes, incluso en casos de erupciones bastante moderadas. La erupción del Laki, Islandia, producida en 1783, aunque sólo liberó 12 kilómetros cúbicos de lava basáltica, mató al 75 por ciento del total del ganado y con el tiempo al 24 por ciento de la población del país. El suceso fue seguido, en todo el hemisferio Norte, por extrañas nieblas secas y por un invierno anormalmente frío.

Usando como modelo la erupción del Kilauea, Terrence M. Gerlach, del Laboratorio Nacional de Sandia en Albuquerque, estimó que, a lo largo de un período de unos 100 años, las mesetas del Deccán inyectaron en la atmósfera inferior 30 billones de toneladas de dióxido de carbono, seis billones de toneladas de azufre y 60.000 millones de toneladas de halógenos (elementos reactivos, como el cloro y el flúor). Las emisiones de la erupción del Laki parecen haber sido mucho mayores de lo que se correspondería si nos limitáramos a extrapolar, a ese caso, las cifras del Kilauea; las estimaciones realizadas pueden representar, pues, un valor mínimo. El azufre y el polvo emitidos al aire desde una colada de lava de 1000 kilómetros cúbicos disminuiría la media global de temperaturas en tres o cinco grados Celsius.

Otros factores podrían instar el efecto opuesto. Marc Javoy y Gil Michard, ambos del Instituto de Física

del Globo y la Universidad de París, proponen que el dióxido de azufre de los volcanes del Deccán acidificaron la superficie del océano, acabando con las algas, que extraen dióxido de carbono de la atmósfera y, luego, cuando mueren, lo arrastran al fondo del océano. Las aguas acidificadas del océano también habrían disuelto los sedimentos de carbonato cálcico del fondo, liberando el dióxido de carbono atrapado allí. En conjunto, los niveles atmosféricos de dióxido de carbono podrían haberse disparado hasta octuplicar la concentración actual, produciendo una elevación de la temperatura de cinco grados centígrados. La interacción entre el enfriamiento provocado por el polvo y el calentamiento derivado del dióxido de carbono (que pudo ocurrir a escalas de tiempo muy diferentes) no está clara, pero con toda probabilidad el cambio climático resultante debió ser especialmente traumático para el ecosistema global. Ambas hipótesis, la del asteroide y la del vulcanismo, predicen efectos, en parte coincidentes, de enfriamiento y calentamiento.

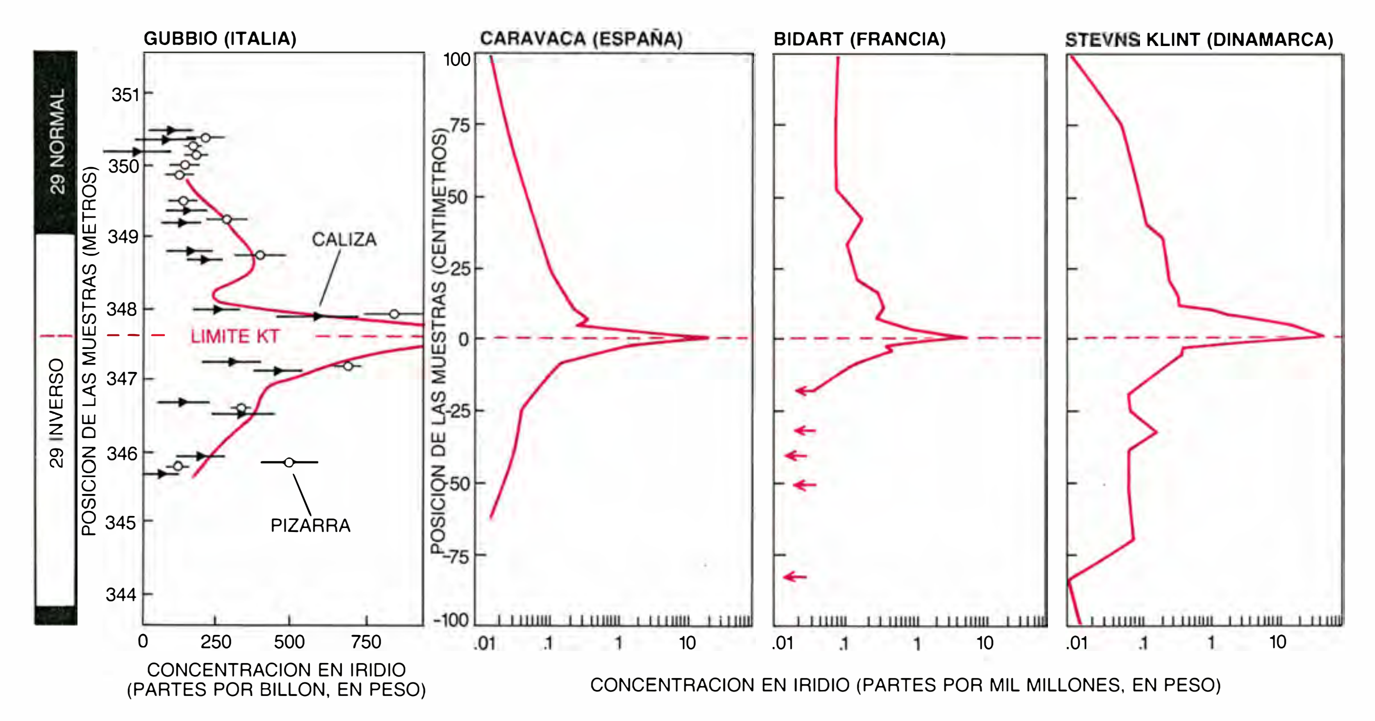
Hasta aquí las pruebas expuestas resultan compatibles con ambas hipótesis. Pero muchos detalles sugieren que la extinción en masa y los insólitos procesos físicos que ocurrieron al final del Cretácico se produjeron a lo largo de cientos de miles de años. Ese intervalo es comparable con la duración del vulcanismo del Deccán, pero incompatible con el súbito impacto de un asteroide.

Varios paleontólogos han señalado que la extinción del final del Cretácico no fue un episodio simple e instantáneo. Las tasas de extinción parece que habían ya comenzado a incrementarse un millón de años antes del límite KT. Ni siquiera cerca del límite el modelo es uniforme: por ejemplo, las especies de foraminíferos planctónicos y de nanoplancton (algas calcáreas microscópicas) exhiben diferentes modelos de extinción y recuperación. Este tipo de secuencia desigual recibe el nombre de extinción escalonada en masa.

Uno de los estudios sobre modelos de extinción más completos es el que recientemente ha llevado a cabo Gerta Keller, de la Universidad de Princeton. Cuando Keller analizó las secciones bien conservadas del límite KT de Túnez y Texas, encontró pruebas de una primera fase de extinción (observada también en el registro fósil de la macrofauna) que comenzaba 300.000 años antes de la anomalía de iridio del límite KT, así como de otra extinción que tenía lugar 50.000 años después del límite. Keller atribuyó el primer suceso a una disminución del nivel de los mares, acompañada de un enfriamiento global.

Otras pruebas confirman que la Tierra sufrió no una, sino muchas alteraciones al final del Cretácico. Por ejemplo, se produjeron cambios bruscos en la concentración de carbono 13 y de oxígeno 18 (que son, respectivamente, las versiones ligera y pesada de estos elementos y cuyas concentraciones varían de acuerdo con la temperatura y acidez del océano y con el número de organismos presentes). Las extinciones y las fluctuaciones de carbono 13 observadas en estratos situados en España aparecen dentro de intervalos magnéticos que encajan en el mismo modelo de polaridad magnética, normal-inversa-normal, hallado en las mesetas del Deccán.

El propio contenido en iridio parece presentar una serie de ligeras fluctuaciones cerca del límite KT. Robert Rocchia y sus colegas, de la Comisión francesa de la Energía Atómica y del Centro Nacional para la Investigación Científica, en Gif-sur-Yvette y Saclay, encontraron, en la arcilla del límite KT de España y Dinamarca, picos secundarios de iridio situados por encima y por debajo de la capa de iridio principal (correspondientes a intervalos de tiempo de unos 10.000 años). Rocchia, yo mismo y nuestros colegas encontramos que la capa con enriquecimiento en iridio de Gubbio parece prolongarse por un período de unos 500.000 años. Los tan discutidos cristales de cuarzo con huellas de choque presentan un



6. EL IRIDIO podría haberlo dejado un asteroide en su impacto o una erupción volcánica generalizada. La elevada concentración en iridio observada en los estratos del límite Cretácico-Terciario, en zonas de Italia, España, Francia y Dinamarca, se extiende a lo largo de un intervalo de unos 500.000 años. El impacto de un asteroide habría producido un aumento en el contenido en iridio repentino y bien definido. Las erupciones del Deccán, por el contrario, parecen haber persistido justamente durante el lapso de tiempo en el que se observa la distribución anómala de iridio.

modelo de distribución similar. Officer y Carter descubrieron que en Gubbio aparecen minerales con huellas de impacto a lo largo de cuatro metros de sección, lo que de nuevo corresponde a un lapso de tiempo de unos 500.000 años.

James C. Zachos y sus colaboradores, de la Universidad de Rhode Island, analizaron la composición química de fósiles microscópicos procedentes del suelo oceánico del Pacífico norte y hallaron que la productividad de la vida en mares abiertos quedó paralizada en el momento del límite KT y en los 500.000 años siguientes. Llegaron también a la conclusión de que los cambios ambientales de interés, enfriamiento incluido, comenzaron al menos 200.000 años antes del límite.

Para explicar estos hallazgos, algunos defensores de la teoría del impacto, y de forma muy particular Piet Hut y sus colegas, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, no tardaron en sustituir el impacto de un solo asteroide por una serie de impactos de cometas. La búsqueda de una respuesta conciliadora llevó también a sugerir que las mesetas del Deccán podrían señalar el lugar donde se produjo el impacto del asteroide. Pero la idea presenta muchas dificultades. No se ha hallado huella alguna de un impacto en la India. Robert S. White, de la Universidad de Cambridge, ha mostrado que los grandes impactos no pueden desencadenar un vulcanismo generalizado porque la porción del manto que está situada debajo mismo de la litosfera (formada por la corteza, relativamente rígida, y por el manto superior) no suele contener grandes bolsas de roca fundida. Además, el vulcanismo del Deccán comenzó durante un intervalo geomagnético normal, unos miles de años antes de iniciarse el intervalo magnético inverso que contiene la capa de arcilla y la anomalía de iridio del Cretácico-Terciario.

Durante el período Cretácico, el vulcanismo se incrementó, el nivel del mar subió y bajó de forma brusca y el manto del planeta cambió. Lo mismo el Cretácico que su período precedente, el Jurásico, fueron épocas de grandes roturas continentales. Entre 120 y 85 millones de años atrás, el campo magnético terrestre, además de sufrir una inversión magnética, comenzó a invertirse de nuevo entre 15 y 20 millones de años antes del límite KT. La frecuencia de las inversiones (indicadora de la actividad existente en el núcleo de la Tierra y en el límite entre manto y núcleo) ha venido incrementándose regularmente desde entonces hasta alcanzar una cada 250.000 años en los últimos tiempos.

Todos estos rasgos pueden estar relacionados con un episodio de movimientos de convección en el manto que comenzó decenas de millones de años antes del límite KT. En mi opinión, la coincidencia de anomalías paleontológicas, geológicas y geodinámicas, de corta y larga duración, señala la existencia de una causa interna común.

¿Cuál podría ser la causa? Una respuesta verosímil nos la proporciona la teoría de los puntos calientes del manto, desarrollada principalmente por W. Jason Morgan, de la Universidad de Princeton, y otros autores. Peter L. Olson y Harvey Singer, de la Universidad Johns Hopkins, crearon un modelo que puede explicar la existencia de regiones con actividad volcánica persistente. Una pluma de material caliente, con baja densidad y baja viscosidad, se eleva desde la base del manto, formando una cabeza esferoide al tiempo que se abre camino a través de zonas del manto más frías y densas. La cabeza continúa creciendo en tanto en cuanto siga alimentada a través de un conducto de roca fundida situado por debajo de ella.

White y Dan P. McKenzie, de Cambridge, junto con Mark Richards y Robert A. Duncan, de la Universidad estatal de Oregón, y yo mismo, pensamos que, cuando una pluma caliente del manto se eleva, la corteza suprayacente, aupada, se estira hasta que se cuartea y se abre un rift continental [véase "Vulcanismo en los rifts", por Robert S. White y Dan P. McKenzie; Investigación y Ciencia, septiembre de 1989]. Al alcanzar la superficie, el material de la pluma sufre descompresión y, por esta causa, se funde rápidamente (en menos de un millón de años). La cabeza de la pluma produciría la elevación de una gran área de corteza, de tal modo que, cuando el magma irrumpiera a través de la superficie, fluiría pendiente abajo con gran rapidez produciendo coladas muy extensas.

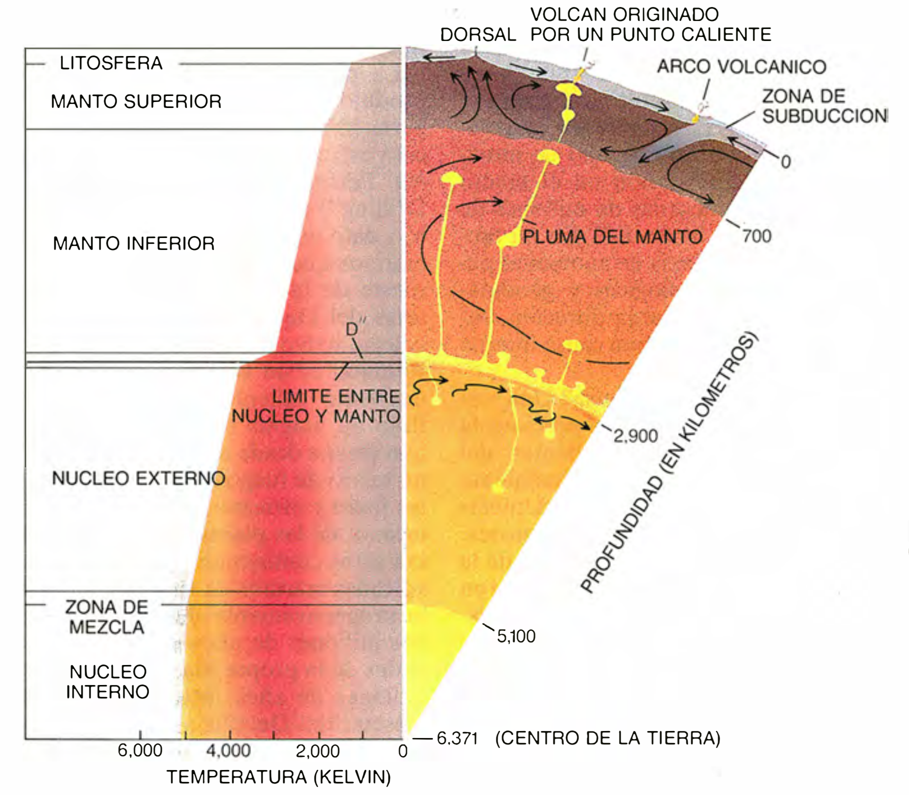
Las erupciones del Deccán podrían haber sido la consecuencia de la llegada de una cabeza de este tipo a la base de la litosfera. El vulcanismo originado por una pluma caliente sería rápido y episódico. Las coladas fluirían durante días o semanas; de una colada a la siguiente pasarían años o miles de años. El gran alcance de las consecuencias ecológicas de cada erupción podría explicar las extinciones en masa escalonadas.

La pluma gigante del manto que produjo las mesetas del Deccán debería haber dejado vestigios dinámicos y estructurales. En 1987, el Programa Perforación Oceánica ("Ocean Drilling") dirigido por Duncan exploró y dató una cadena de volcanes submarinos que se extiende desde el suroeste de la India, cerca de las mesetas del Deccán, hasta Reunión, el volcán activo al este de Madagascar. Reunión es un volcán producido por un punto caliente: formado por un flujo de magma de origen profundo que emana desde el manto, ha dejado un rastro de fuego entre los continentes indio y africano, al paso, sobre el mismo, de las placas en que se asientan estos continentes. La edad de los volcanes marinos de Reunión aumenta progresivamente desde cero hasta dos millones de años en las proximidades de la propia isla y hasta 55 o 60 millones de años justo al sur de las mesetas del Deccán.

Richards y Duncan creen, y yo con ellos, que el punto caliente de Reunión puede representar la cola de magma caliente que, según cabría esperar, siguiese la estela de la pluma que produjo las mesetas. Besse Vandamme y yo verificamos que el punto caliente del manto que ahora se encuentra bajo Reunión, estaba a finales del Cretácico localizado precisamente bajo las mesetas del Deccán. No hay vestigios del punto caliente antes del límite KT, sino que el episodio de violento vulcanismo del Deccán parece señalar el momento de su aparición en la superficie de la Tierra.

La actividad geológica interna, asociada a una pluma ascendente del manto, encaja con el comportamiento del campo magnético terrestre en el momento del límite KT. Se cree que los causantes del campo geomagnético son los lentos movimientos de convección —10 kilómetros por año— del hierro fundido que existe en la parte externa del núcleo terrestre. Las inversiones magnéticas podrían deberse a inestabilidades surgidas en la zona de contacto entre núcleo y manto.

El calor que escapa desde el núcleo eleva la temperatura de la capa más profunda del manto (la capa D''), rebaja la densidad de los materiales que la constituyen y provoca su engrosamiento hasta convertirla en inestable y crear plumas ascendentes de magma. Los largos períodos de tiempo con pocas o ninguna inversión de la polaridad magnética, como el lapso comprendido entre 120 y 85 millones de años antes de la actualidad, indi-



7. MODELO DE PLUMAS DEL MANTO, en representación esquemática de una sección transversal del interior de la Tierra. El calor que escapa del núcleo externo engrosa la capa más baja del manto, capa D'', interrumpiendo los movimientos de convección del núcleo, que son los que producen las inversiones del campo magnético. Con el tiempo, la capa D'' se rompe formando enormes plumas ascendentes. La ausencia de inversiones magnéticas durante el Cretácico puede indicar una capa D'' que se encontraba en crecimiento, hasta llegar a formar las plumas calientes que produjeron vulcanismo catastrófico —las mesetas del Deccán— cuando, hace 65 millones de años, alcanzaron la superficie. El Piton de la Fournaise, en la isla de la Reunión, representaría la cola de la pluma.

can ausencia de actividad en el núcleo externo y paralización del engrosamiento de la capa D''.

Hace unos 80 millones de años la capa se fragmentó, impulsando el ascenso de enormes plumas calientes de magma. En este momento habría aumentado el flujo de calor desde el núcleo hacia el manto y se habrían reanudado las inversiones magnéticas. Viajando a las velocidades típicas del manto, aproximadamente un metro por año, las plumas tardarían escasos millones de años en alcanzar la superficie; aquí, su descompresión súbita produciría un vulcanismo explosivo, seguido de grandes flujos de lava. Algunas plumas secundarias menores no llegarían a la superficie, pero acelerarían los movimientos de convección del manto y el proceso de la expansión del suelo oceánico, amén de inducir cambios en el nivel del mar y otras alteraciones geológicas que tuvieron lugar durante el Cretácico.

Esta clase de cataclismos geológicos puede ser la consecuencia natural de que la Tierra es una activa y compleja máquina térmica, compuesta por diferentes capas que presentan propiedades físicas y químicas enormemente distintas. Una convección en el manto, uniforme y bien regulada, y unas fases de fuerte inestabilidad, del tipo de las que generan plumas, son quizá los dos extremos de los diversos modos que tiene de escapar hacia el exterior el calor interno de la Tierra.

Si así opera la Tierra, entonces deberían haberse producido otras catástrofes semejantes. Entre los episodios de extinción recientes (entendiendo por tales los producidos desde que comenzó la era Mesozoica, hace 250 millones de años), los principales parecen presentar una correlación temporal con fenómenos de grandes erupciones basálticas. Y, lo que es más interesante, el período más largo conocido sin inversiones del campo magnético de la Tierra también finalizó con la mayor de las extinciones en masa, la que marca el nacimiento de la era Mesozoica. Más del 95 por ciento de las especies desaparecieron en aquella época. Hacia las mesetas de Siberia, con una antigüedad de 250 millones de años, apuntan todas las pistas que buscan el responsable de esa extinción.

Ambas hipótesis, la del asteroide y la del vulcanismo, conceden a las catástrofes de corta duración una importancia grande en el desarrollo de la evolución de la vida. Semejante enfoque podría parecer contradictorio con el principio del uniformitarismo, principio arraigado en geología en virtud del cual el estado presente del mundo puede explicarse invocando la actuación, durante largos intervalos de tiempo, de los mismos procesos geológicos que tienen lugar hoy día. Desde el punto de vista cualitativo, las erupciones volcánicas y los impactos de meteoritos son fenómenos habituales. Pero, desde una óptica cuantitativa, el episodio sufrido por los dinosaurios difirió de cualquier otro de los sucedidos en, al menos, los últimos 250 millones de años.

Las inversiones magnéticas en el núcleo terrestre y la formación en el manto de grandes plumas ascendentes pueden ser manifestaciones de un sistema caótico. Las variaciones, a lo largo de los últimos cientos de millones de años, en la frecuencia de las inversiones magnéticas y en la rotura de continentes insinúan que tal sistema, la Tierra, podría ser cuasi-periódico: los episodios volcánicos catastróficos parecen haber ocurrido a intervalos de 200 millones de años, con eventos menores espaciados a intervalos de unos 30 millones de años.

Resulta tentador imaginar la posibilidad de que el nacimiento de la era Paleozoica, hace 570 millones de años, con la aparición de la vida pluricelular, coincidiera con uno de esos episodios. Las grandes extinciones abren de repente amplios espacios ecológicos que permiten el desarrollo de nuevos organismos. Acontecimientos que, en principio, parecen haber sido desastrosos pueden, en verdad, haber representado un papel decisivo en la evolución de la vida compleja.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LATE CRETACEOUS AND PAROXYSMAL CRETACEOUS/TERTIARY EXTINCTIONS. Charles B. Officer, Anthony Hallam, Charles L. Drake y Joseph D. Devine en *Nature*, vol. 326, n.º 6109, págs. 143-149; 12 de marzo de 1987.

MAGNETIC FIELD REVERSALS, POLAR WIND AND CORE-MANTLE COUPLING. V. Courtillot y J. Besse en *Science*, vol. 237, n.º 4819, págs. 1140-1147; 4 de septiembre de 1987.

THE DECCAN FLOOD BASALTS AND THE CRETACEOUS/TERTIARY BOUNDARY. V. Courtillot, G. Féraud, H. Maluski, D. Vandamme, M. G. Moreau y J. Besse en *Nature*, vol. 333, n.º 6176, págs. 843-846; 30 de junio de 1988.

Tomografía acústica del océano

Los oceanógrafos emplean principios análogos a la tomografía médica de rayos X para obtener imágenes tridimensionales de corrientes y temperaturas marinas

Robert C. Spindel y Peter F. Worcester

En enero de 1981 zarpamos de Woods Hole, Massachusetts, rumbo al suroeste de las Bermudas, hacia una región centrada a 26 grados de latitud Norte y 70 grados de longitud Oeste. A bordo del *Oceanus* llevábamos nuevos instrumentos científicos que funcionaban bien en el laboratorio; debían, sin embargo, someterse a prueba en el corrosivo y agitado océano. Íbamos a emplear ondas acústicas para generar imágenes tridimensionales que ayudaran a comprender las propiedades del océano y sus fluctuaciones a lo largo del tiempo.

Los mares moderan las temperaturas terrestres, condicionan las variaciones estacionales del clima y transportan en disolución productos químicos, nutrientes, contaminantes e incluso plantas y animales de una parte de la Tierra a otra. Este enorme fluido varía de una manera complicadísima. La turbulencia va desde la mezcla constante en pequeña escala y ondas internas hasta corrientes estacionales y a largo plazo y circulaciones a escala de cuencas marítimas, como la corriente del Golfo. No es fácil, pues, realizar mediciones fidedignas de la estructura oceánica con los instrumentos habituales.

Por ello, hemos venido trabajando con nuestros colaboradores, en los últimos diez años, en una técnica: la tomografía acústica oceánica. Igual que la tomografía axial computerizada (TAC) de uso en medicina y la tomografía sísmica que utilizan los geólogos, la tomografía oceánica emplea haces de energía para crear una imagen tridimensional de la región atravesada. En los barridos TAC, los haces de energía están constituidos por rayos X; en la tomografía sísmica, son ondas de choque de los terremotos; y en la tomografía oceánica, ondas sonoras de baja frecuencia.

ROBERT C. SPINDEL y PETER F. WORCESTER han participado en la tomografía acústica del océano desde su iniciación en 1979. Spindel es director del laboratorio de física aplicada de la Universidad de Washington. Tras doctorarse en ingeniería eléctrica por la de Yale, trabajó en la Institución Oceanográfica Woods Hole, donde dirigió el departamento de ingeniería oceánica desde 1982 hasta 1987. Worcester, oceanógrafo de la Institución Scripps, recibió en ésta su doctorado el año 1977.

La técnica tomográfica ha obligado ya a revisar bastantes ideas preestablecidas sobre los mares. Antes de 1965, muchos científicos consideraban la circulación general del océano como formada por corrientes grandes, tranquilas y lentas, como la del Golfo y la de Kuroshivo (que al este del Japón fluye hacia el norte).

Este panorama, basado en cien años de observaciones esporádicas realizadas en todo el globo, ofrecía apenas una tosca representación media de la verdadera circulación. Pero, en los decenios de 1950 y 1960, los científicos comenzaron a emplear técnicas y equipos nuevos; entre ellos: boyas sumergidas, que se movían con las corrientes oceánicas y emitían señales de identificación (lo que permitía seguirlas desde barcos), y correntímetros oceánicos que registraban datos durante varios meses en posiciones fijas del océano.

Estos instrumentos pusieron de manifiesto un inesperado nivel de variabilidad en las profundidades oceánicas. Lejos de caracterizarse por corrientes continuas, de la extensión de las cuencas, que varían estacionalmente (si es que varían algo), los mares están dominados por campos de mesoescala: corrientes fluctuantes, de alta energía, cuya velocidad llega a decuplicar la velocidad media de las grandes corrientes.

Los fenómenos de mesoescala —la analogía oceánica de los sistemas meteorológicos portadores de mal tiempo— abarcan una longitud de 100 kilómetros y persisten durante 100 días (los sistemas meteorológicos suelen tener unos 1000 kilómetros de diámetro y duran de tres a cinco días). Más del 90 por ciento de la energía cinética de la totalidad del océano se puede caracterizar por la variabilidad en mesoescala mejor que por las grandes corrientes; la mesoescala puede desempeñar un papel importante en la mezcla oceánica, en las interacciones mar-aire y en sucesos climáticos ocasionales aunque importantes.

Las técnicas habituales de medida, desgraciadamente, no están a la altura de la tarea. Para caracterizar bien el campo de mesoescala, los equipos de observación deberían espaciarse a intervalos máximos de 50 kilómetros. En cada nudo de la red, los sensores tendrían que descender hasta la profundidad media oceánica de alrededor de cinco kilómetros y mantenerse en su sitio muchos meses.

Un cartografiado con tal detalle resultaría prohibitivamente caro y poco práctico. Para cubrir un área de 1000 por 1000 kilómetros, se necesitarían unas 400 boyas instrumentadas. Hoy día, la comunidad investigadora internacional instala menos de 50 boyas de esta clase cada año; el número total de las mismas en el mundo es muy inferior a las 2000 necesarias.

Los barcos constituyen otra opción, pero deberían detenerse cada 50 kilómetros para arriar los instrumentos de medición. Además, una exploración exhaustiva de un millón de kilómetros cuadrados requeriría diez buques dedicados exclusivamente a la toma de datos. Las medidas desde satélites proporcionan una información útil, pero son incapaces de sacar datos relativos al interior oceánico.

Para superar las limitaciones de las técnicas habituales, Walter H. Munk y Carl Wunsch propusieron en 1979 que se adaptara la tomografía para medir las propiedades físicas del

océano. En la tomografía médica, o exploración TAC, los rayos X cartografían las variaciones de densidad (y, con ello, los órganos internos) del cuerpo; la información de los rayos X, transmitida a través del cuerpo a lo largo de muchos caminos diferentes, se recombina matemáticamente para formar una imagen tridimensional.

Munk y Wunsch arguyeron que, con la transmisión de señales acústicas a lo largo de muchos caminos, podrían deducirse las propiedades del interior del océano (temperatura, salinidad, densidad y velocidad de las corrientes) basándose en la alteración oceánica de las señales. Había nacido la tomografía acústica del océano.

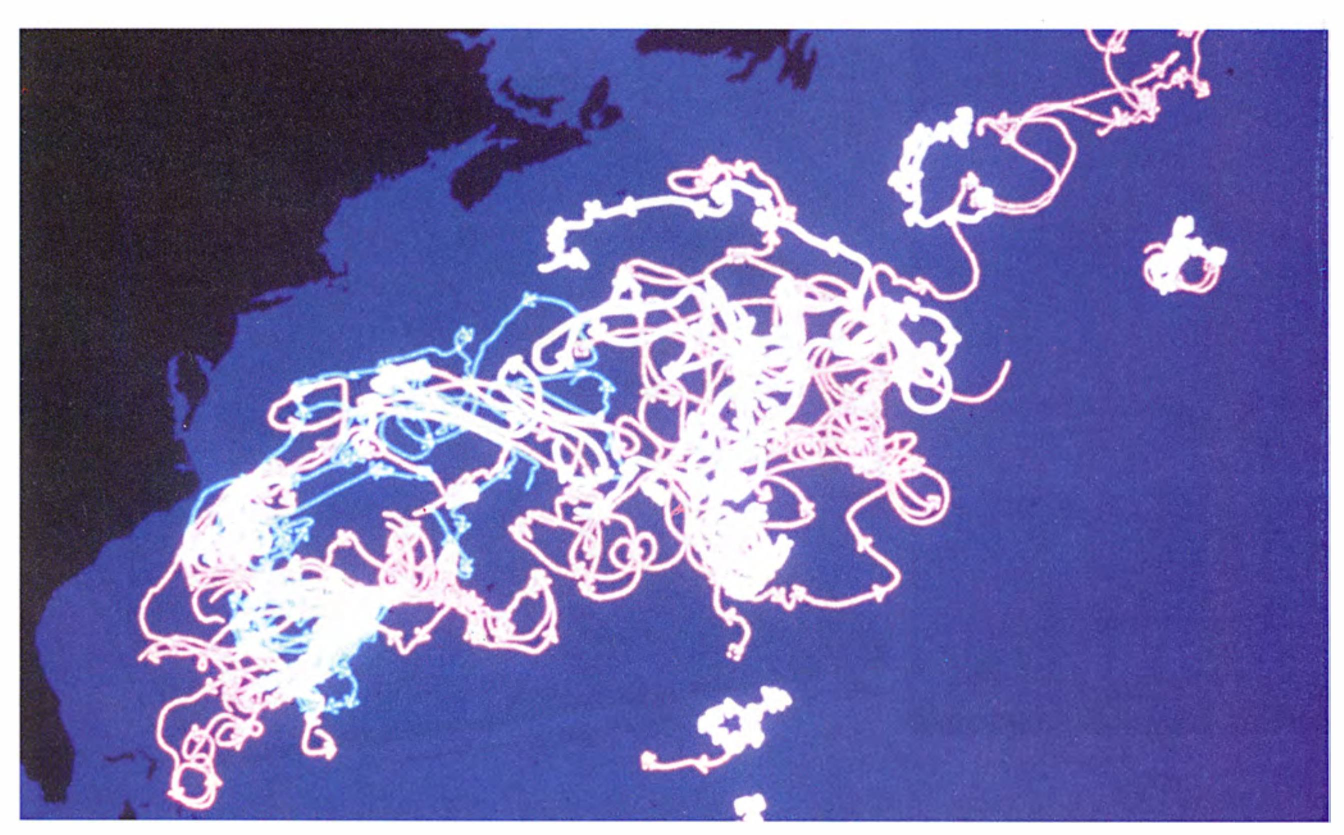
Para entender de qué manera opera la tomografía acústica del océano, conviene conocer la propagación del sonido en el mar. Las leyes matemáticas que rigen otros fenómenos ondulatorios —piénsese en la radiación electromagnética de una bombilla o la vibración de una cuerda de violín—, determinan también las propiedades de las ondas acústicas en el agua: cómo se refractan y atenúan esas ondas, cómo disminuye su intensidad al propagarse desde la fuente, cómo se aceleran o frenan cuando se propagan dentro de las corrientes oceánicas. Ahora bien, las ondas acústicas están matemáticamente descritas; por tanto, las perturbaciones en el campo sonoro proporcionan la información necesaria para determinar las corrientes y temperaturas del océano.

La información más importante que los científicos obtienen de las ondas sonoras que se propagan a través del agua proviene de las variaciones de su velocidad. La velocidad del sonido aumenta, sobre todo, cuando lo hacen la presión y la temperatura. Como el sol calienta la superficie del océano, el sonido tiende a propagarse allí más deprisa que en aguas más profundas y frías. Su velocidad disminuye al aumentar la profundidad, llegando a alcanzar un mínimo (a unos 1000 metros en las zonas templadas). Por debajo de esta profundidad, el aumento de la presión compensa el descenso de la temperatura, y así la velocidad vuelve a aumentar. El resultado es un perfil en el cual el sonido viaja deprisa por la superficie, más lento con la profundidad y procede de nuevo más rápidamente hacia el fondo; aquí puede superar la velocidad de la superficie.

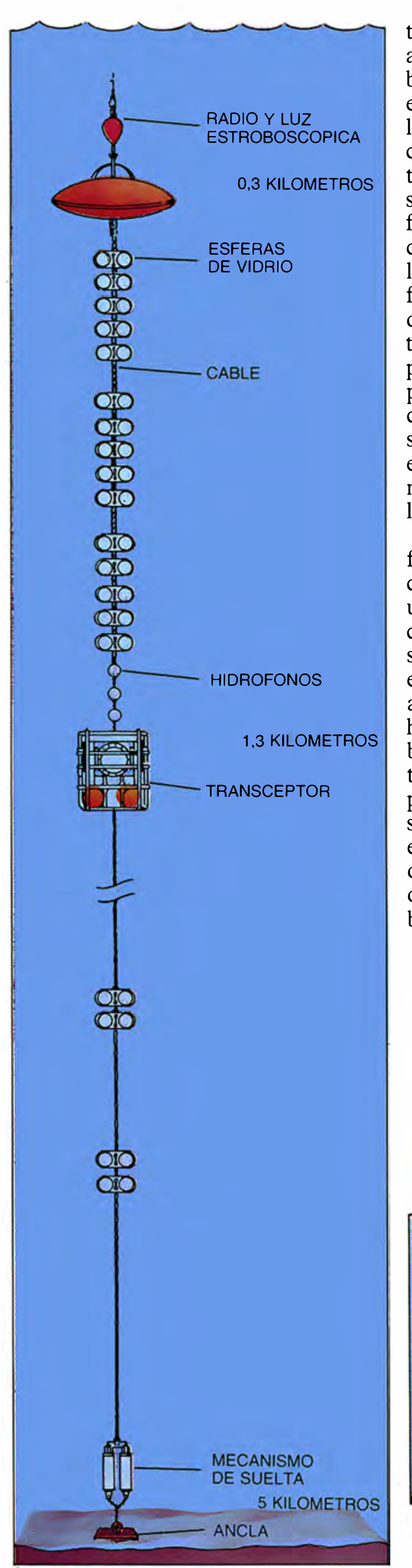
Estas variaciones, sin embargo, representan sólo alrededor del 2 al 3 por ciento de la velocidad media del sonido en el agua, que es aproximadamente de 1500 metros por segundo, unas cinco veces mayor que en el aire. No obstante, tan pequeñas variaciones dan lugar a profundos efectos: producen la refracción de las ondas sonoras al propagarse. Un frente de onda en movimiento se puede comparar con una varilla rígida; si la parte superior de la varilla comienza a moverse más deprisa que la inferior, la dirección del movimiento de la varilla empezará a curvarse en sentido descendente. Por tanto, las ondas sonoras por encima de la profundidad de velocidad mínima se refractan hacia abajo porque la parte superior del frente de onda está en una zona de mayor velocidad; el sonido por debajo de la profundidad de velocidad mínima se curva en sentido ascendente. El efecto neto resultante es aprisionar las ondas sonoras en un "canal", donde oscilan verticalmente dentro de una columna horizontal de agua —sin tocar la superficie ni el fondo— al propagarse.

Este conducto, llamado canal SOFAR (del inglés "sound fixing and ranging", esto es, canal que fija y mantiene en la profundidad el sonido), se descubrió durante la segunda guerra mundial.

En el canal SOFAR, conocido ahora como eje del canal de sonido profundo, la hondura de mínima velocidad es máxima en las latitudes ecuatoriales, en torno a los 1300 me-



1. TRAYECTORIAS DE UNA CORRIENTE INTERNA en el océano Atlántico, obtenidas mediante una boya en deriva libre, que se mantiene a una profundidad predeterminada. Revela las corrientes de rápida fluctuación y alta energía de la plataforma continental oriental de los USA.



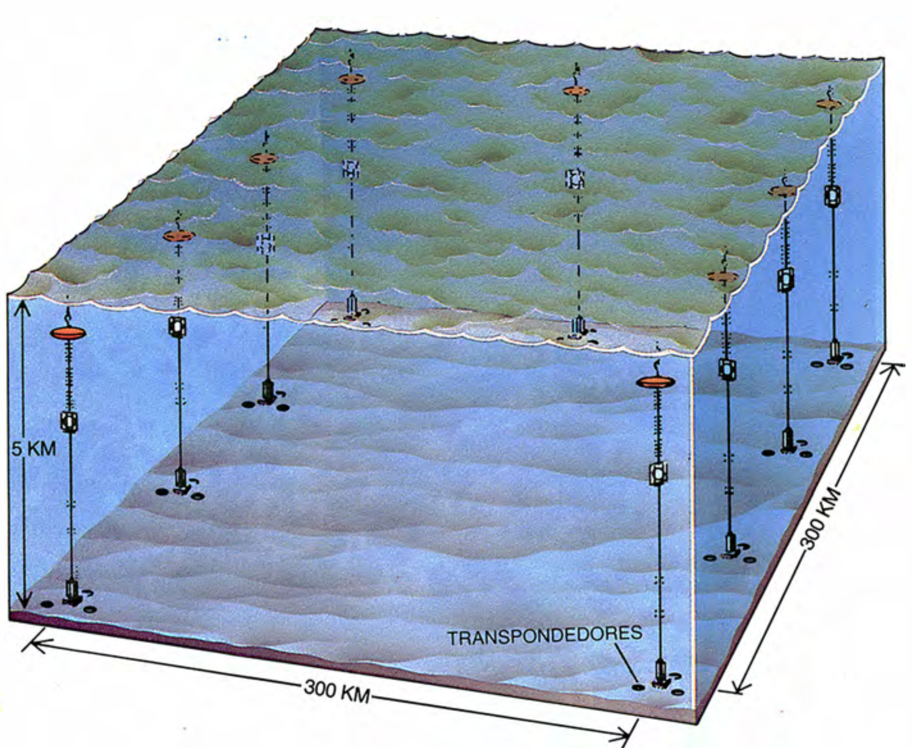
tros. A esta profundidad, el efecto del agua muy caliente de la superficie sobre la velocidad del sonido compensa el efecto de la presión creciente con la hondura. A 30 grados de latitud, con aguas superficiales menos calientes que en zonas ecuatoriales, el eje se halla a unos 1000 metros de profundidad. A altas latitudes, donde el calentamiento solar es despreciable y las aguas están casi uniformemente frías desde la superficie hasta el fondo, la velocidad del sonido queda determinada virtualmente por la sola presión. Las ondas sonoras que se propagan se refractan, pues, sólo hacia arriba; se reflejan en la superficie, se dispersan y pierden energía. Por ello, las transmisiones de sonido son más difíciles cerca del Artico que en los mares templados.

Pero incluso para señales que se refractan y quedan aprisionadas en el canal, los oceanógrafos tienen que usar ondas sonoras de baja frecuencia; evitan así que la energía acústica se atenúe a lo largo de las distancias entre transmisores y receptores. Las altas frecuencias —las de varios kilohertz— se atenúan prestamente, debido a procesos químicos y movimiento molecular del agua. Los sonidos por encima de 10 kilohertz apenas si se pueden detectar a 10 kilómetros; en cambio, las emisiones por debajo de 100 hertz cubren fácilmente miles de kilómetros sin pérdidas apreciables de energía. En 1960, los sonidos de baja frecuencia procedentes de cargas de profundidad disparadas por el buque de investigación *Vema*, frente a la costa de Australia, llegaron a los receptores de las Bermudas 3,5 horas más tarde, tras haber recorrido 19.000 kilómetros, la mitad de la vuelta al mundo.

El canal de sonido profundo no sólo produce propagación aprisionada —base de la transmisión y recepción del sonido a larga distancia—, sino que también hace que las ondas sonoras emitidas a diferentes ángulos se propaguen a lo largo de trayectorias distintas y separadas. Esta propagación multitrayecto —la base de la tomografía— explora el plano vertical entre cada par emisor-receptor.

Los rayos sonoros lanzados casi paralelamente al eje del canal de sonido profundo se propagan próximos a éste, en la región donde el sonido viaja despacio. Los rayos dirigidos formando grandes ángulos, hacia arriba o hacia abajo, se propagan en sentido ascendente cerca de la superficie y en sentido descendente cerca del fondo, describen trayectorias cuasi-sinusoidales y pasan la mayor parte del tiempo en regiones de alta velocidad.

Aunque los rayos lanzados con gran ángulo recorren distancias totales mayores que los lanzados casi paralelamente al eje, llegan, en la mayor parte de las regiones del océano, antes al receptor porque se propagan más deprisa. Un estallido sonoro, el



2. UN ANCLAJE TOMOGRAFICO usa una radio y una luz estroboscópica de alta intensidad para identificarse, a efectos de recuperación posterior. Grandes esferas de vidrio proporcionan la fuerza ascensional que compensa el peso del cable. Con un conjunto de anclajes se cartografió una zona cercana a las Bermudas. Tres transpondedores acústicos rodean cada ancla y miden el ligero movimiento debido a las corrientes internas.

de una explosión por ejemplo, se recibe en un punto distante en forma de réplicas del sonido original. La diferencia entre los instantes de llegada de las señales primera y última, o amplitud del multicamino, viene a ser de un segundo por cada 100 kilómetros entre el emisor y el receptor. Aunque existen docenas de multicaminos para cada par emisor-receptor, sólo se resuelven con claridad de 10 a 15.

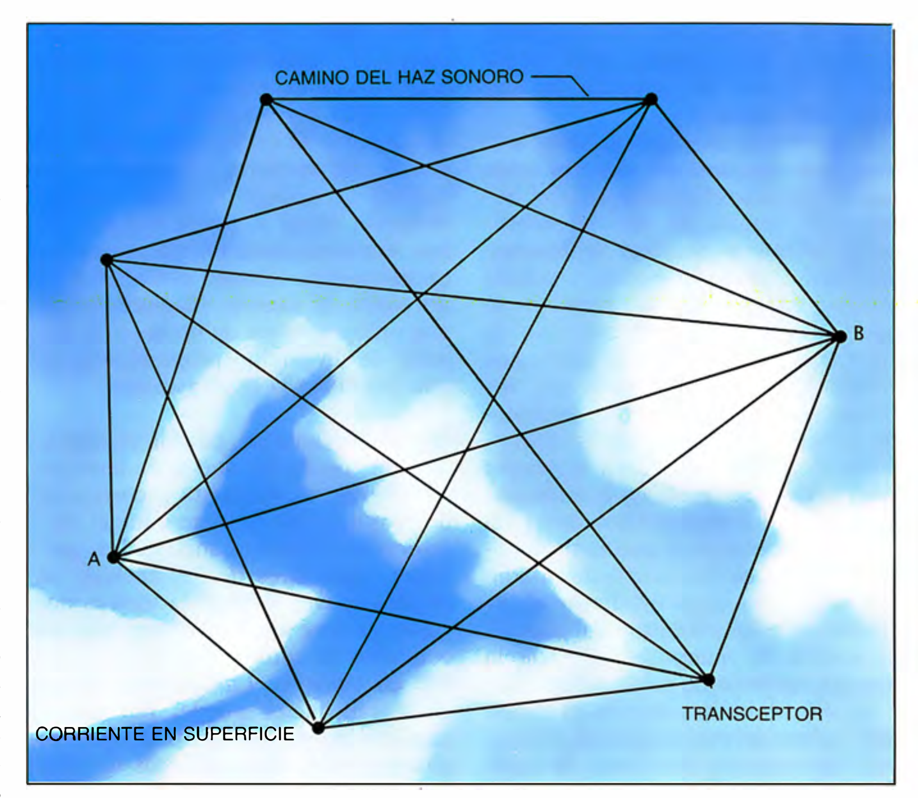
Cada señal, al haberse propagado a lo largo de un camino diferente del de las otras, se mueve a través de una parte distinta de la columna de agua; por ejemplo, los caminos próximos al eje del canal de sonido profundo recogen sólo datos de las propiedades de las aguas a esa profundidad. El camino recorrido por cada impulso sonoro determina su tiempo propio de llegada, facilitando la identificación de la columna de agua explorada.

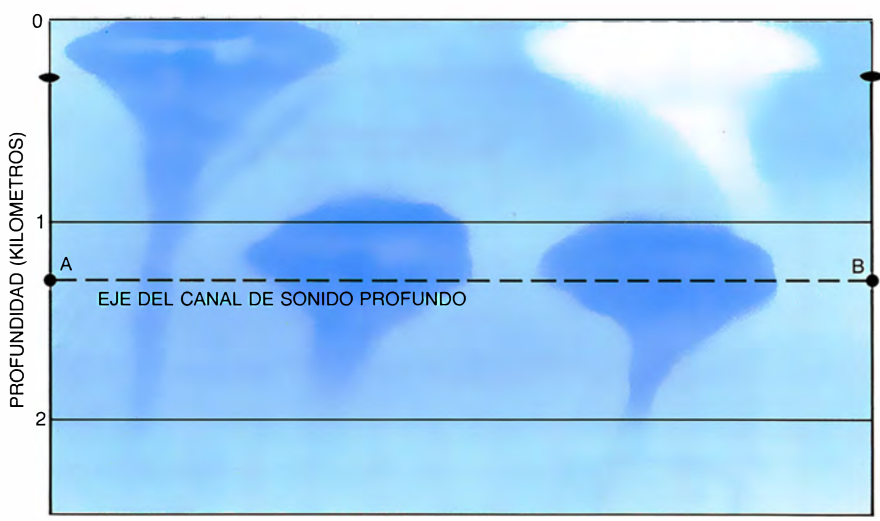
Cada fuente transmite a cada uno de los receptores; fórmase una red de rayos sonoros que se cortan en una superficie horizontal [*véase la figura 3*]. Cuando se añaden más emisores o receptores, el número de rayos posibles aumenta a ritmo mucho mayor que el que se logra con los instrumentos convencionales, que no obtienen datos de rayos que se cruzan. El incremento multiplicativo de los datos constituye uno de los atractivos de la tomografía: otorga a los investigadores la posibilidad de explorar vastas superficies con pocos instrumentos.

Los investigadores en tomografía pueden también aumentar la cantidad de datos usando transductores en cada boya, en vez de emisores y receptores en distintas boyas. Las señales enviadas desde A y recibidas en B revelarán sólo las variaciones de temperatura entre ellas. Pero si B también envía señales a A, los especialistas podrán determinar la velocidad de las corrientes.

Para crear mapas tomográficos detallados del océano, los investigadores colocan emisores y receptores de sonido (o transductores) en la proximidad del eje del canal de sonido profundo. Cada emisor envía periódicamente un impulso sonoro de baja frecuencia, que cada receptor recibe en forma de una serie de impulsos de réplica. Para explorar la zona, se coloca un número suficiente de transmisores y receptores por la región a medir; se ajustan los tiempos de emisión para detectar las variaciones del océano a lo largo del tiempo.

Por los mismos años en que Munk y Wunsch propusieron su idea, comenzaba ya a estar lista la técnica necesaria para poner en funcionamiento la tomografía acústica. En 1979, los





3. TRANSCEPTORES usados en tomografía acústica oceánica. Distribuidos por el océano, esos aparatos miden corrientes y temperaturas enviando señales de uno a otro (*dibujo superior*). Un corte vertical entre A y B revela remolinos en el océano invisibles en la superficie (*dibujo inferior*).

ingenieros de la Institución Oceanográfica Woods Hole, la Universidad de Michigan en Ann Arbor y Scripps se apresuraron a desarrollar instrumentos para llevar a cabo experimentos de tomografía. Para generar los sonidos de baja frecuencia, modificaron la boya SOFAR, diseñada en un principio para seguir las corrientes oceánicas en el canal de sonido profundo. El equipo usado en tomografía emite una señal cifrada que se distingue fácilmente del ruido de fondo; las señales cifradas son semejantes a las usadas por el vehículo espacial *Voyager* para emitir débiles señales a la Tierra. El receptor descifra y almacena las señales. La boya SOFAR sufrió las adaptaciones necesarias para sostenerla amarrada en un lugar fijo, sin dejarla derivar con la corriente.

La medida del tiempo en tomografía acústica debe hacerse de manera precisa, porque las variaciones del tiempo de propagación causadas por las fluctuaciones en mesoescala son pequeñas. Por ejemplo, el sonido, propagándose a 1500 metros por segundo, tarda 670 segundos en recorrer 1000 kilómetros en el océano; un remolino de mesoescala que tiene una anomalía de temperatura de un grado Celsius produce una variación de sólo 50 a 100 milisegundos en el tiempo to-

tal de propagación de 670 segundos. La tomografía requiere, pues, medidas del tiempo con precisión de uno a dos milisegundos.

Pero incluso un pequeño reloj atómico que consuma 10 watt sin cesar usa demasiada electricidad; para alimentarlo durante un año, se necesitarían 8000 pilas alcalinas de linterna, cantidad demasiado grande y pesada para ser útil. Los mismos paquetes de baterías con la más alta densidad de energía existente serían inviables, por grandes y costosos. De ahí que los oceanógrafos recurrieran a osciladores menos exactos y menos ávidos, también, de energía. Para mantener la exactitud requerida en la medición del tiempo, los microprocesadores del transductor conectan automáticamente un patrón de frecuencia de rubidio una vez al día para recalibrar el oscilador de baja potencia. Tal sistema de medida del tiempo necesita sólo la energía equivalente a 100 pilas.

La dificultad final estriba en el método habitualmente empleado para situar instrumentos en el mar. Se ancla al fondo un cable, con una boya sumergida; los instrumentos se conectan al cable a las profundidades deseadas. El conjunto entero debe mantenerse bajo la superficie del océano para evitar los efectos de las olas inducidas por el viento, que, amén de alterar las medidas, someten a esfuerzos el anclaje y causan rápido desgaste, fatiga y, con el tiempo, fallos. Para recuperar los instrumentos, un mecanismo situado cerca del fondo suelta el anclaje (cuando recibe una orden acústica de un barco o una señal de un equipo programado), lo que permite a la boya ascender.

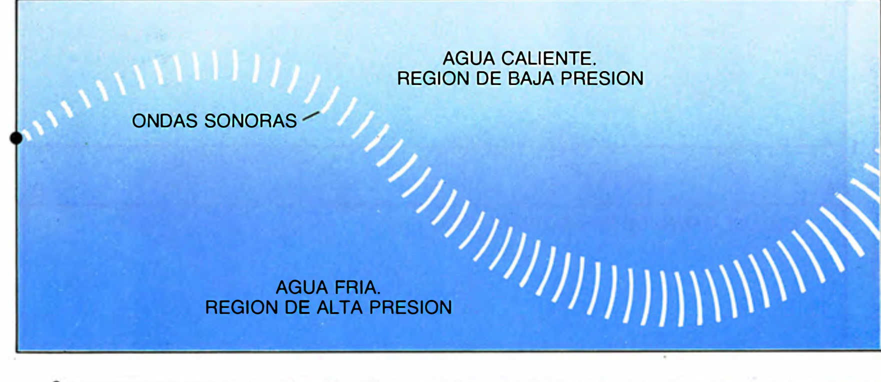
El inconveniente, para la tomografía, reside en que tales anclajes se mueven en respuesta a corrientes de profundidad, lo mismo que el barco deriva en torno al anclaje. Las porciones superiores de los anclajes se pueden mover cientos de metros horizontalmente en el océano, incluso con miles de kilos de tensión en el cable de amarre. La distancia entre cada transductor puede, por tanto, cambiar en varios cientos de metros, alterando los tiempos netos de propagación de las ondas sonoras transmitidas en más de 100 milisegundos. Estas alteraciones aparecen en forma de ruido y confunden las señales, cuyos tiempos de propagación varían sólo de 50 a 100 milisegundos.

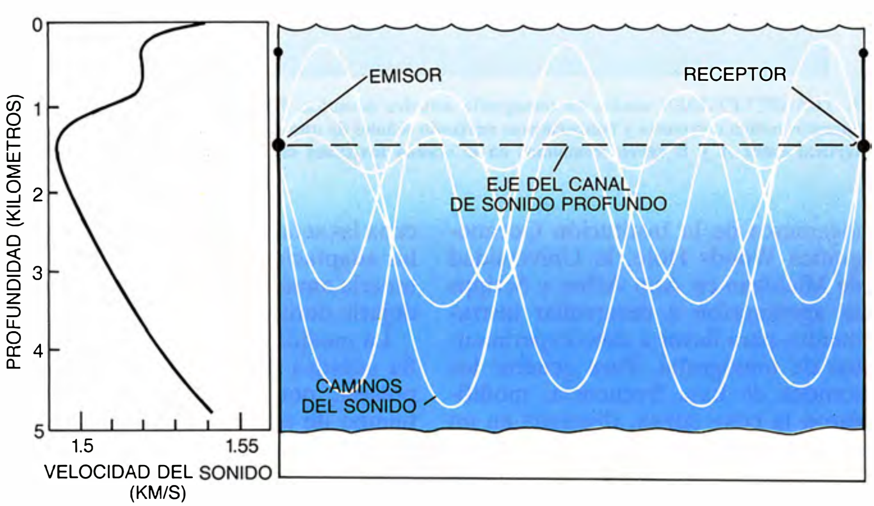
Con el fin de compensar este movimiento, los investigadores idearon un sistema de seguimiento de la posición para medir las desviaciones. Se sitúan tres transpondedores acústicos (instrumentos que transmiten un impulso en respuesta a una señal acústica) sobre el fondo del mar, formando un triángulo equilátero alrededor del punto de anclaje y, por tanto, del transceptor. Un dispositivo alojado en cada unidad transceptora emite un impulso de alta frecuencia, de unos 10 kilohertz, y mide el tiempo entre la emisión y la recepción de una réplica de cada transpondedor, que "contesta" a la señal de 10 kilohertz. Este proceso determina la posición del transceptor respecto a los transpondedores con un error de un metro; así se minimizan los errores causados por los movimientos.

Los métodos matemáticos que se emplean en oceanografía para convertir los datos medidos en mapas de la temperatura del océano y líneas de corriente son similares a los usados por los sismólogos para construir mapas del interior de la Tierra a partir de las ondas sísmicas que los terremotos generan. Pero, dadas las diferencias esenciales entre las dos clases de campos, los oceanógrafos no pueden limitarse a tomar prestadas las técnicas sin modificación. Los sismólogos nunca han podido obtener medidas directas a profundidades superiores a unos pocos kilómetros por debajo de la superficie terrestre; en su defecto, han tenido que extraer de los terremotos la información que poseen acerca del interior de la Tierra. Por consiguiente, los modelos que los sismólogos construyen con sus datos ofrecen una descripción limitada.

Los oceanógrafos, por el contrario, tienen una gran ventaja: las medidas directas en el océano les han permitido construir modelos teóricos concisos y calcular estadísticas a partir de esas descripciones. Pueden confrontar sus datos con los modelos y usarlos como guía para futuras observaciones. Por ironía de las cosas, su capacidad de realizar mediciones directas del interior del océano retrasó, probablemente, el desarrollo de técnicas de teledetección, la tomografía acústica de los océanos entre ellas.

Otra diferencia entre la tomografía sísmica y la tomografía acústica del océano reside en la estabilidad de la Tierra, notable a lo largo de la vida de un ser humano, y en la variación constante del océano. Los métodos matemáticos empleados para cons-





4. REFRACCION DE LAS ONDAS SONORAS producida cuando porciones distintas del mismo frente de onda se propagan a velocidades diferentes (*arriba*). En el océano, la velocidad del sonido varía con la profundidad (*abajo, izquierda*); así, las señales se refractan siempre que encuentran las aguas calientes de la superficie o las altas presiones de las profundidades; quedan aprisionadas en un canal y se pueden propagar a lo largo de miles de kilómetros. Los sonidos emitidos a diferentes ángulos se propagan por diferentes zonas de los mares y aportan información de todo el plano vertical (*abajo, a la derecha*). Sólo se muestran aquí algunos de los 10 a 15 caminos reconstruibles.

truir los mapas oceanográficos deben, pues, tener en cuenta que los datos del océano dependen del tiempo, lo mismo que los modelos de predicción del tiempo deben adaptarse a las rápidas variaciones de éste.

Hacia principios de 1981, se había reunido el equipo necesario, se habían definido los cálculos matemáticos para convertir los datos en mapas y se había elegido la región oceánica de prueba. Con nuestros colaboradores nosotros situamos nueve balizas en un cuadrado de 300 kilómetros centrado a unos 600 kilómetros al sudoeste de las Bermudas. Esta zona se hallaba sometida a estrecha vigilancia en el marco del Experimemto de Dinámica del Centro del Océano (MODE); se conocía, pues, la oceanografía general del lugar, lo que permitía realizar a priori un modelado fidedigno y proporcionar una base para los resultados tomográficos. Para comparación ulterior, los instrumentos convencionales y los buques de exploración recogieron datos durante los experimentos.

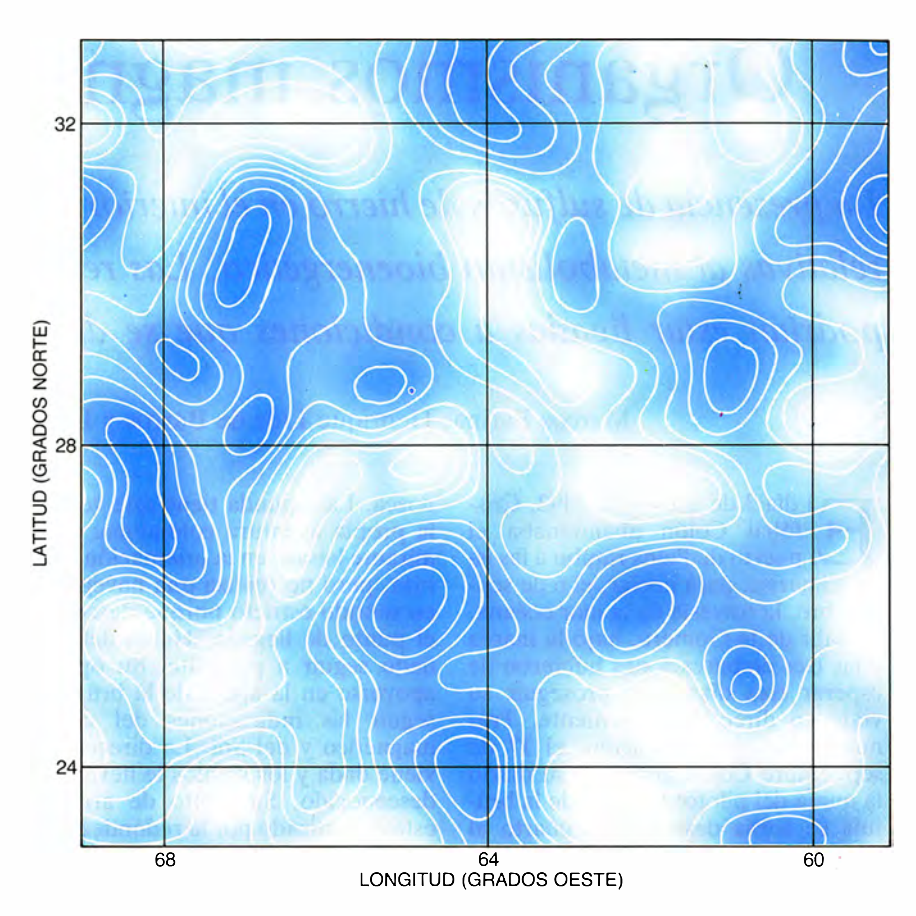
Nuestro colega Bruce D. Cornuelle, de Scripps, obtuvo imágenes de la zona de 90.000 kilómetros cuadrados a partir de los datos tomográficos. Comprobamos la validez de los resultados de las pruebas comparándolos con las exploraciones de los buques, los datos de los instrumentos anclados y las estadísticas obtenidas en el MODE el año 1972. La tomografía acústica del océano produjo las primeras instantáneas de un volumen de océano de este tamaño en menos de 24 horas. Por contra, el buque de exploración, que había de detenerse cada 50 kilómetros durante cuatro o cinco horas para obtener lecturas, tardó tres semanas en construir la representación que, habida cuenta del largo tiempo de "exposición" transcurrido, las variaciones del campo de mesoescala tornaron borrosa.

Siguieron otros experimentos. Con nuestros colaboradores, anclamos un conjunto de transceptores en el mar de Groenlandia, para estudiar los efectos del viento sobre las corrientes y la mezcla de aguas profundas allí. Wunsch, Paola Malanotte-Rizzi y sus colaboradores, del MIT, estudiaron la variabilidad de la extensión de la corriente del Golfo en la región central del Atlántico Norte. Harry A. DeFerrari usó la tomografía para medir la energía de los vórtices en el estrecho de Florida, angosto brazo de mar a través del cual pasa la mayor parte de la corriente del Golfo.

Además de producir mapas de corrientes locales y torbellinos, la tomografía acústica del océano se puede emplear para medir corrientes promediadas en su espacio, así como temperaturas de regiones que se extienden miles de kilómetros. En 1983, con Bruce M. Howe, de Scripps, medimos con éxito promedios a lo largo de 300 kilómetros de temperaturas y corrientes en el Atlántico, en función de la profundidad. Tres años después, desplegamos un conjunto de transceptores, en un triángulo de 1000 kilómetros de lado, para medir los promedios espaciales a largo alcance de temperaturas y corrientes en el Pacífico Norte. Si podemos realizar un estudio a tan largo alcance, síguese que la tomografía acústica del océano debe, en principio, permitir también la medición simultánea de las temperaturas de la mayor parte de las aguas mundiales. Proeza que podría proporcionar pistas sobre el calentamiento global.

Se está estudiando la manera de mejor integrar los datos tomográficos con los recabados mediante instrumentos en libre deriva, a bordo de buques exploradores o anclados en el mar. Se quiere, asimismo, eliminar la necesidad de muchos anclajes fijos, usando un "anclaje" único suspendido de un buque en movimiento, creando un conjunto tomográfico sintético. Nos interesa sobremanera combinar los datos tomográficos con los del satélite *Experimento topográfico oceánico*, cuyo lanzamiento está previsto para 1992. El satélite recogerá datos relativos a la superficie del océano, a diferencia de la tomografía, que los extrae del interior.

La tomografía acústica ha comenzado a ocupar su lugar en la caja de herramientas del oceanógrafo. La colaboración original entre los científicos se ha ampliado para dar cabida a investigadores de distintas organizaciones. Es de esperar que en los próximos años se descubran mayores aplicaciones para la tomografía, que redundarán en nuevos e importantes conocimientos sobre los océanos.



5. CORTE TOMOGRAFICO SIMULADO construido a partir de modelos teóricos. Muestra un ejemplo del campo de temperatura en mesoescala a unos 700 metros de profundidad. La alternancia de aguas cálidas (*claro*) y frías (*oscuro*) es la analogía oceánica de los sistemas meteorológicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

OCEAN ACOUSTIC TOMOGRAPHY: MESOSCALE VELOCITY. B. M. Howe, P. F. Worcester y R. C. Spindel en *Journal of Geophysical Research*, vol. 92, n.º C4, págs. 3785-3805; abril de 1987.

OCEAN ACOUSTIC TOMOGRAPHY: A PRIMER. Robert A. Knox en *Oceanic Circulation Models: Combining Data and Dynamics*. Dirigido por D. L. T. Anderson y J. Willebrand. Kluwer Academic Publishers, 1989.

Organismos magnetotácticos

La presencia de sulfuros de hierro en el interior de la célula plantea cuestiones relativas al metabolismo bioenergético. Las reacciones que precipitan pirita podrían estar ligadas a condiciones que se daban en el origen de la vida

Marcos Farina, Henrique Lins de Barros y Darci Motta Esquivel

El día 3 de agosto de 1492, Cristóbal Colón abandonaba el puerto de Palos rumbo a las islas Canarias, para iniciar, el 6 de septiembre, la travesía de la mar océana. Al salir de la Gomera, bajó la marea y las tres embarcaciones hubieron de esperar tres días para proseguir su viaje en dirección a poniente. Tras nueve días de navegación, el 17 de septiembre Colón anotó en su diario la queja del piloto: la aguja de la brújula se había desviado un cuarto al noroeste, con la consiguiente preocupación de la marinería. Colón mandó corregir el rumbo hacia el norte y atribuyó la desviación de la aguja al movimiento aparente de la estrella Polar. En el día anterior, a tenor de los indicios, las tres embarcaciones habían cruzado la línea de declinación cero del campo magnético y siguieron en dirección de declinación oeste. La variación de la declinación del campo era, en aquella época, un hecho desconocido; Colón había preferido la información magnética sobre la astronómica.

La anécdota histórica nos plantea dos cuestiones curiosas. En primer lugar, la observación realizada por los pilotos de Colón constituyó la primera verificación de la declinación del campo geomagnético que se conozca. La segunda tiene que ver con la propia aventura colombina: el almirante básase en la orientación de su ruta, pero no realiza una navegación en sentido estricto porque desconoce el punto de llegada. Había determinado seguir a poniente. Su opción: apoyarse en la aguja de la brújula y seguir las indicaciones del campo magnético y del Sol. La dirección le viene dada y los vientos le llevan a lo desconocido. Su punto de arribada está garantizado por la redondez de la Tierra.

MARCOS FARINA, HENRIQUE LINS DE BARROS y DARCI MOTTA ESQUIVEL comparten, desde distintos ángulos, un mismo interés por los curiosos fabricantes de brújulas microscópicas, que son los organismos magnetotácticos. Farina se formó en la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro y se doctoró en el Instituto de Biofísica de la Universidad Federal de Río, donde es profesor adjunto. Lins de Barros procede también de la Universidad Católica y es vicedirector del Museo de Astronomía y Ciencias Afines. Esquivel estudió física en la Universidad de São Paulo, recibiéndose de doctor en 1980. Trabaja en el Centro Brasileño de Investigaciones Físicas en Urca.

Unos cien años más tarde, William Gilbert publicó *De Magnete, magneticisque corporibus et de magno magnete tellure* ("Sobre el imán, los cuerpos magnéticos y la tierra considerada como un gran imán"), donde se mide, por vez primera, la inclinación del campo geomagnético. En este trabajo, el médico inglés compara el campo terrestre con el campo producido por una esfera imantada. Una tercera componente del campo, su intensidad, no se mediría hasta 1832 por Karl F. Gauss, matemático alemán.

El campo geomagnético puede determinarse, en efecto, por estas tres componentes: inclinación, o ángulo que forma el vector con el plano horizontal tangente a la superficie de la Tierra en el punto considerado; declinación, o ángulo que el componente horizontal de campo forma con la dirección del norte geográfico, e intensidad. El valor típico de intensidad del campo geomagnético es de 0,5 gauss, aun cuando podemos hallar regiones donde ese campo presenta valores de 0,7 gauss. En la región que abarca los estados de Río de Janeiro, São Paulo y Minas Gerais, en el sudeste del territorio brasileño, encontramos campos del orden de 0,2 gauss. En esta anomalía del Atlántico meridional, así se conoce la región, es donde se registran los campos más débiles.

En el hemisferio norte magnético, el campo apunta hacia abajo, es decir, de acuerdo con la convención adoptada su inclinación es positiva. En el hemisferio sur magnético ocurre lo contrario: el campo, que apunta hacia arriba, presenta inclinación negativa. La región próxima al ecuador terrestre se halla en la línea del ecuador magnético y, por consiguiente, su inclinación de campo es nula y éste corre paralelo a la superficie de la Tierra. En el Brasil, el ecuador magnético pasa cerca de la ciudad de Fortaleza, en el estado de Ceará, para bajar en dirección sur a medida que avanza hacia el oeste.

Los efectos magnéticos desempeñan un papel importante en la vida cotidiana. Una interacción magnética es sólo un ejemplo de una fuerza de acción a distancia, una vez que las fuerzas electrostáticas han perdido su carácter permanente y la gravitacional se presenta exclusivamente como fuerza de atracción. Por su parte, la fuerza magnética atraviesa cualquier obstáculo y se da en ambas formas, de atracción y repulsión; su intensidad, por lo demás, es lo suficientemente alta para poder ser registrada por cualquier observador alejado. De ahí que los materiales magnéticos desempeñen un papel especial en nuestras experiencias ingenuas. Por esa misma razón, el magnetismo apareció en la historia ligado a los fenómenos anímicos más que relacionado con fenómenos físicos. Platón, por ejemplo, no aborda las cuestiones magnéticas en su tratado científico del *Timeo*, sino en el diálogo *Ion*, dedicado a la inspiración creadora y donde apela al magnetismo para trazar analogías con la figura de la musa. Así como la musa inspira al poeta y no pierde su poder inspirador, el imán atrae al hierro sin que merme su poder de atracción. Aristóteles, por su lado, recurrirá al magnetismo para ejemplificar el movimiento que el alma da al cuer-

po, no ocupándose de las fuerzas de acción a distancia en su *Física*. En los trabajos médicos de Hipócrates y Galeno encontramos la utilización del material magnético para el tratamiento de distintos humores.

El propio Gilbert, observador atento y médico cuidadoso, ve en el principal mineral magnético natural, la magnetita (F_3O_4), un remedio importante para el tratamiento de varias molestias, aun cuando admita que su poder sanador pueda ir asociado a la pequeña corrosión que presenta. Los efectos magnéticos aparecen relacionados con el ser vivo desde las postrimerías del siglo XVIII. En los años que precedieron a la revolución francesa, Mesmer dejaba a la sociedad parisiense de su tiempo boquiabierta con su terapia mediante campos magnéticos. A pesar del torbellino que levantó, no podemos considerar científicos los trabajos de Mesmer, ni tomar en serio sus curas. El magnetismo animal de Mesmer era una noción confusa, transida de incongruencias, propia de una visión ingenua del mundo.

El racionalismo científico de la época procuró, en vano, obtener respuesta para la influencia del magnetismo sobre el ser vivo y, a partir de entonces, efectos magnéticos y seres vivos pasaron a abordarse por separado, aun cuando la ciencia no abandonara la medición de las propiedades magnéticas en sistemas biológicos. La creación de campos intensos en el laboratorio, superiores a los 10 kilogauss, produjo ciertas alteraciones en el organismo, que se atribuyeron a modificaciones químicas inducidas por transiciones moleculares.

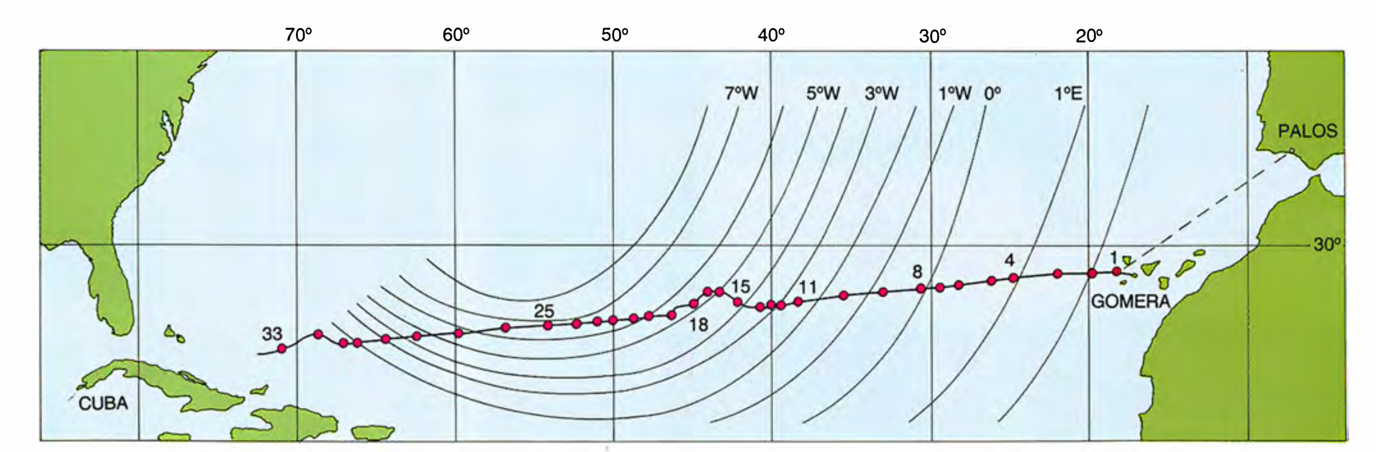
Los estudios realizados, a partir de la segunda mitad de nuestro siglo XX, en vuelos de retorno al nido de ciertas aves, demostraron que los animales poseían algún sensor delicado, capaz de detectar cambios sutiles en el medio. Se planteó entonces la hipótesis según la cual estarían capacitadas para percibir el campo magnético terrestre, pero no pudo llegarse a ninguna conclusión.

Así estaban las cosas hasta que en 1975 Richard Blakemore, microbiólogo de la Universidad de Durham, publicó las primeras pruebas incuestionables de la interacción entre el campo geomagnético (o magnético) y el ser vivo. Al observar muestras de agua recogidas en sedimentos de Woods Hole, Blakemore advirtió que un gran número de bacterias nadaban hacia un extremo de la gota de agua situada sobre la platina del microscopio. Pensó, en un comienzo, que tal vez se tratara de alguna suerte de fototaxia (orientación hacia la luz), pero luego comprobó que ocurría lo mismo sin estímulo luminoso; las bacterias seguían aglomerándose en el mismo extremo de la gota. Verificó, a continuación, que la respuesta observada se alteraba drásticamente en presencia de un campo magnético. Las observaciones de Blakemore mostraban que ciertas bacterias se orientaban en el campo magnético terrestre y nadaban paralelamente a las líneas de campo. Los análisis de microscopía electrónica y otras técnicas demostraron que en el interior de esas células había cristales de magnetita, un mineral fuertemente magnético, muy común en la superficie terrestre. En diversas bacterias se ha puesto de manifiesto que los cristales forman una cadena casi lineal que actúa como la aguja de la brújula. Cada cristal encontrado en el citoplasma se halla envuelto por una membrana biológica, prueba de que la magnetita forma parte de un orgánulo especializado: el magnetosoma.

La orientación magnética de las bacterias caracteriza un tipo de taxis en el que el campo magnético aparece como estímulo, por cuya razón se le denomina magnetotaxia y, magnetotácticos, los microorganismos que lo presentan.

El comportamiento de las bacterias magnetotácticas, fácil de describir, puede observarse sin grandes dificultades. Se coloca la muestra de sedimento acuoso natural sobre el portaobjetos del microscopio óptico. Se enfoca el objetivo hacia una de las extremidades de la gota, de suerte que el campo de visión quede dividido entre una región líquida y la otra. A continuación, se introduce un imán permanente de tipo comercial o se adapta un par de bobinas de Helmholtz. Los microorganismos magnetotácticos emigrarán hacia un extremo de la gota, en la trayectoria paralela a la línea del campo magnético. Cuando alteremos el sentido del campo, por la rotación del imán o por inversión de la corriente en las bobinas, los microorganismos darán una vuelta en U y emigrarán en la dirección opuesta. Las velocidades de emigración pueden ser bastante altas; las bacterias de 1 micrometro de diámetro llegan hasta los 200 micrometros por segundo.

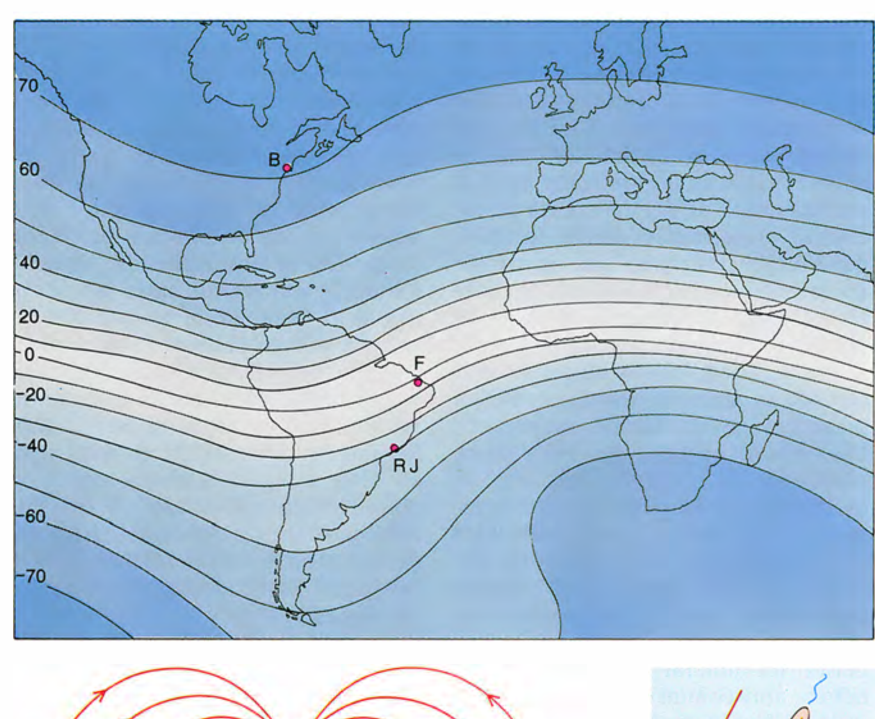
La orientación magnética presentada por estos microorganismos admite una explicación sencilla. El material magnético hallado en el citoplasma produce un momento magnético resultante que interactúa con el campo externo. Interacción que se

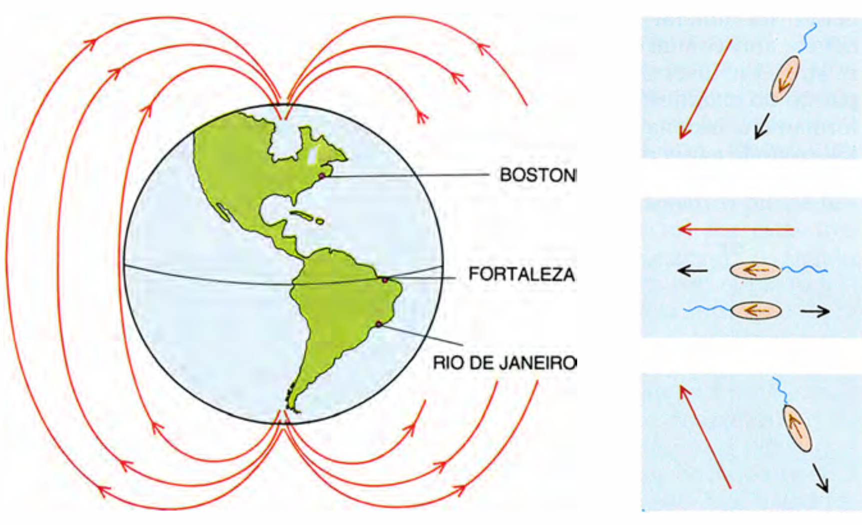


1. RUTA DEL DESCUBRIMIENTO y líneas de declinación del campo geomagnético en la época del viaje de Colón. Los números sobre los puntos de la ruta indican los días, partiendo de la fecha en que Colón dejó la isla de la Gomera. Al octavo día de viaje, pasó la línea de declinación cero. En su diario anota la disparidad que se produjo entre la lectura de la brújula y la información astronómica. Tomó entonces la decisión de dejarse guiar por la información magnética, lo que no deja de llamar la atención, desde el punto de vista histórico, habida cuenta de la confianza que se tenía en la información astronómica sobre cualquier otra. Aquel apunte constituyó, pues, el primer registro de observación de la declinación geomagnética.

desarrolla en el sentido de orientar la cadena de cristales en línea de campo a través de un par de fuerzas proporcional al momento magnético de la célula y al campo magnético. La fuerza magnética, en este caso, es despreciable, ya que depende del gradiente de campo. En las condiciones experimentales usuales, o en la naturaleza, el campo magnético es homogéneo en las dimensiones características de los microorganismos. El desplazamiento observado débese a la acción del flagelo, orgánulo de la motilidad de esos organismos.

Tenemos, pues, en resumen, que el microorganismo suspendido en un medio se comporta como una brújula microscópica natural y que la acción flagelar produce el desplazamiento observado. En esas dimensiones, el movimiento se caracteriza por un bajo número de Reynolds, es decir, se produce un escoramiento perfectamente lamelar. Las fuerzas inerciales no son significativas y la mecánica del desplazamiento se parece más a una física aristotélica, de velocidad proporcional a la fuerza, que a una física newtoniana. El movimiento de rotación del flagelo produce una fuerza resultante sobre el cuerpo celular y el microorganismo avanza. Avance que viene condicionado por la agitación térmica descrita por el movimiento browniano.





2. VARIACION DEL CAMPO GEOMAGNETICO, o, lo que es lo mismo éste no es constante. Sus tres componentes varían en función del punto de superficie que consideremos. La inclinación del campo varía desde los 70 grados de latitud Norte, aproximadamente, hasta los -70 grados Sur. La región del ecuador magnético, es decir, la de inclinación nula de campo, se halla próxima al ecuador geográfico. El campo geomagnético puede asociarse a un campo de una esfera magnetizada en la que el polo sur magnético coincida con el norte geográfico, y a la inversa. Los microorganismos magnetotácticos emigran en dirección descendente siguiendo las líneas de campo. Descubrimos dos tipos de microorganismos con respecto a las propiedades magnéticas. Los tipos norte poseen momento magnético paralelo a las velocidades de migración; los microorganismos de tipo sur tienen momento magnético antiparalelo a su velocidad de desplazamiento. Ambos coinciden en el ecuador magnético.

La orientación magnética, para ser eficaz, tiene que vencer las perturbaciones del medio, en general, y la perturbación térmica, en particular. Podemos hacernos una idea de la orientación magnética comparando la energía de interacción entre la célula con el campo externo (mH) y la energía térmica (kT), donde m es el momento magnético celular, H la intensidad de campo magnético, k la constante de Boltzman y T la temperatura absoluta. A temperatura ambiente, la energía browniana, dada por kT, es de $4{,}4 \times 10^{-14}$ erg.

En la modificación del movimiento no interviene sólo la perturbación térmica; hay que atender también a las perturbaciones propias del medio: corrientes, flujos, etcétera. En ese entorno de alteraciones a veces rápidas, viven las células magnetotácticas. El tiempo de re-orientación, es decir, el tiempo necesario para que una célula magnetotáctica abandone la posición en que el momento magnético es antiparalelo al campo magnético por otra posición en que los dos sean paralelos, constituye una magnitud importante a considerar. Si el tiempo de reorientación fuera superior al tiempo medio de las perturbaciones críticas, esto es, perturbaciones capaces de hacerle perder el rumbo a las células, no se producirá entonces ninguna orientación eficaz.

Podemos calcular el tiempo de reorientación a partir de hipótesis sencillas sobre la forma de la célula: una bacteria aislada en el medio, sometida a un campo homogéneo y dejando de lado los factores relacionados con el movimiento flagelar. En este enfoque podemos usar una analogía directa con la teoría del paramagnetismo de Langevin. Desde el punto de vista teórico, una población de bacterias magnetotácticas en suspensión en el medio y sin mutua interacción se asemeja a un sistema de dipolos que no ejercen ninguna interacción entre sí, aunque sujetos a una perturbación térmica.

Para una bacteria esférica en la que se considere la fuerza flagelar responsable del desplazamiento longitudinal, el tiempo de re-orientación es directamente proporcional al cubo del radio de la célula. Su expresión matemática viene dada por $t = (8 \pi n R^3 / mH) \ln (2mH / kT)$, donde n es la

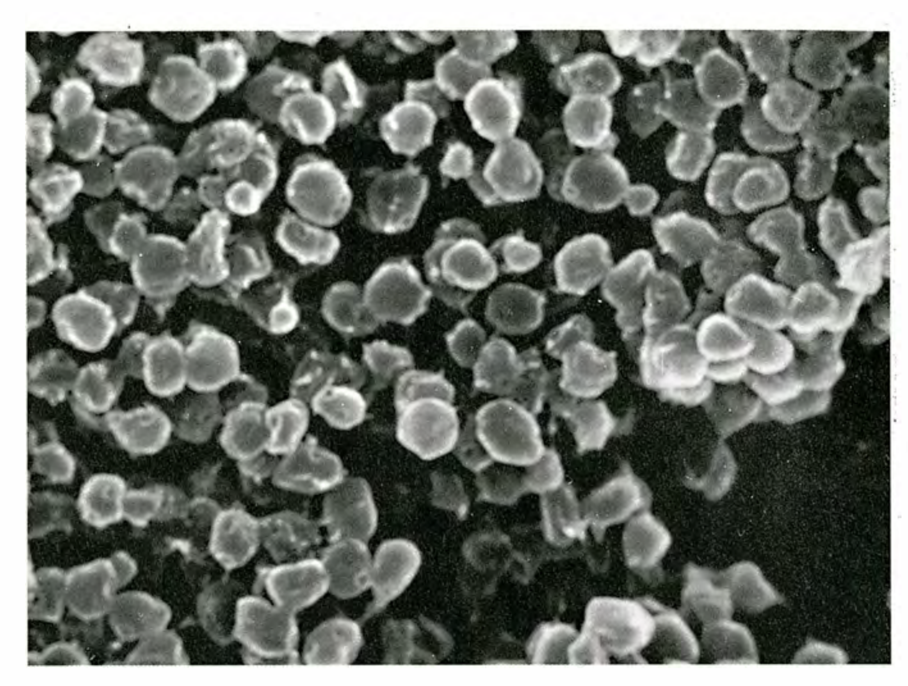
viscosidad del medio ($m_{H_2O} = 10^{-2}$) y R el radio celular (la ecuación para t aporta una forma sencilla de calcular el momento magnético, el campo aplicado y el radio de la célula). Supóngase que t_m sea el tiempo medio entre perturbaciones críticas en el medio. Para que haya orientación magnética efectiva, t tiene que ser inferior a t_m. Esta condición impone un límite superior para el volumen (R^3) de microorganismos magnetotácticos, una vez que el momento magnético está acotado por consideraciones biológicas (el material magnético ocupa un porcentaje de volumen celular; para reducir t sería necesario aumentar esta razón, lo que nos conduciría a una situación imposible bajo el aspecto biológico).

Podemos también estimar el momento magnético de las células magnéticas a partir de la observación directa mediante microscopía electrónica. Diversas células magnetotácticas presentan cadenas lineales de cristales con dimensiones bastante definidas. Aceptando que los cristales están compuestos principalmente de magnetita, podemos calcular el momento magnético celular a través del producto del volumen total de los cristales por la magnetización por la unidad de volumen de la magnetita.

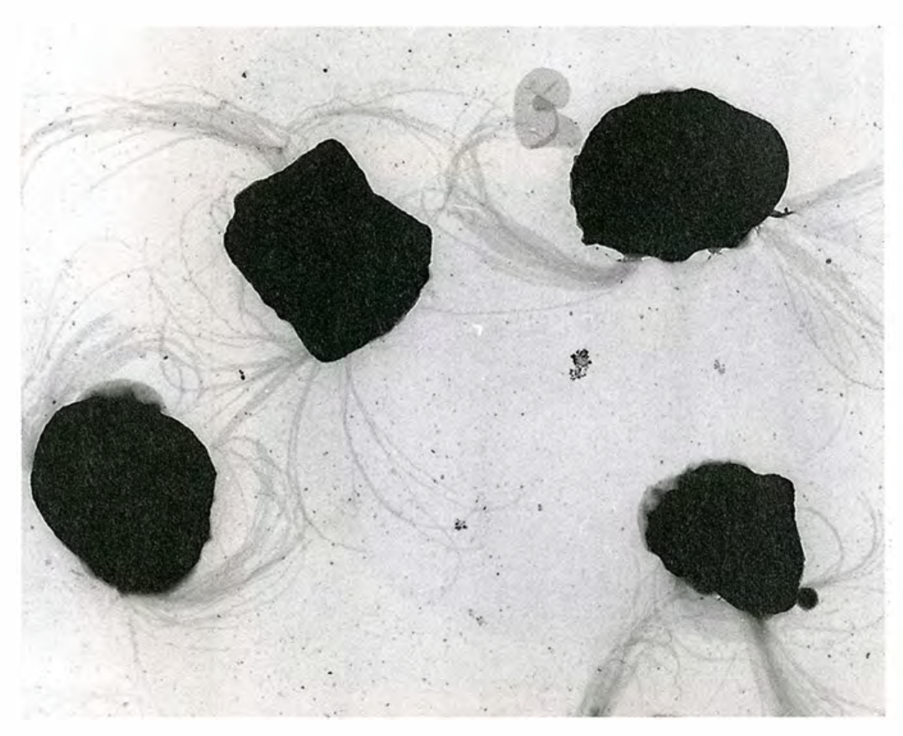
Las bacterias magnetotácticas medran en lugares muy dispares y constituyen poblaciones importantes en los sedimentos acuosos de todo el mundo. Por su parte, la inclinación del campo magnético difiere con el lugar. ¿Cuál es, entonces, la adaptabilidad de los microorganismos al mismo? Hallamos bacterias morfológicamente idénticas en muestras extraídas del hemisferio norte geomagnético y sur magnético. Desde el punto de vista biológico, pertenecen, en efecto, a la misma especie; desde el físico, constituyen un universo simétrico. Ambos, los microorganismos magnetotácticos del sur geomagnético y los de norte geomagnético, emigran hacia abajo, hacia la región de menor concentración de oxígeno molecular. Es probable que todos los microorganismos magnetotácticos sean anaeróbicos (vivan en un ambiente reductor) o microaeróbicos (en bajas concentraciones de oxígeno).

Para que la orientación se ordene siempre hacia abajo, la dirección del momento magnético, en relación con el flagelo, debe ser la contraria a la que manifiestan las bacterias del hemisferio norte y las del sur. Las bacterias del sur, las halladas en el hemisferio sur geomagnético, poseen momento magnético antiparalelo a la dirección del movimiento; dicho de otro modo, su vector momento magnético apunta hacia el terminal flagelar. Las bacterias norte, por contra, presentan una orientación de momento magnético inverso.

Podemos obtener una población sur a partir de una muestra norte, y a la inversa. Para ello basta con aplicar un pulso de campo intenso que invierta la magnetización de los cristalitos. Esta característica de los microorganismos magnetotácticos indica que la producción de material magnético está controlada genéticamente; no así la polarización. Encontramos, en ese sentido, bacterias magnetotác-



3. CONCENTRACION BACTERIANA que puede obtenerse de una simple gota de un medio rico en nutrientes. La fotografía, obtenida con microscopio de barrido, ilustra el borde de la gota y la convergencia de organismos de diámetro diverso. (Blakemore llamó la atención sobre el fenómeno.)



4. CELULAS ENTERAS, depositadas sobre una película transparente, que ponen de manifiesto la distribución bipolar de los flagelos. La imagen se obtuvo con un microscopio electrónico de transmisión.

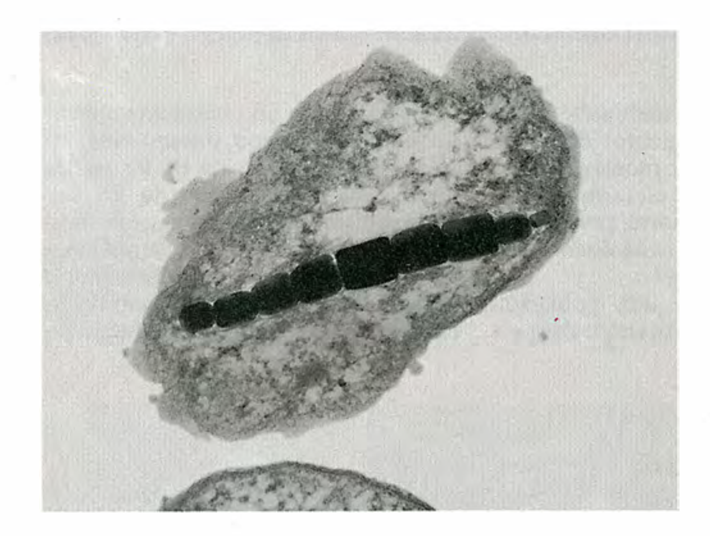
ticas del género *Spirillum* que pueden emigrar en los dos sentidos. Parece darse en ellas una competición entre quimiotaxia (respuesta a un estímulo químico) y magnetotaxia. Cuando se aproximan a la interfase agua-aire invierten el movimiento y corren hacia la extremidad de la gota. En la región del ecuador magnético se encontraron poblaciones de microorganismos magnetotácticos con un reparto equitativo de individuos sur e individuos norte. Desde el punto de vista adaptativo, el ecuador magnético no privilegia a nadie, ni insta la emigración hacia el fondo.

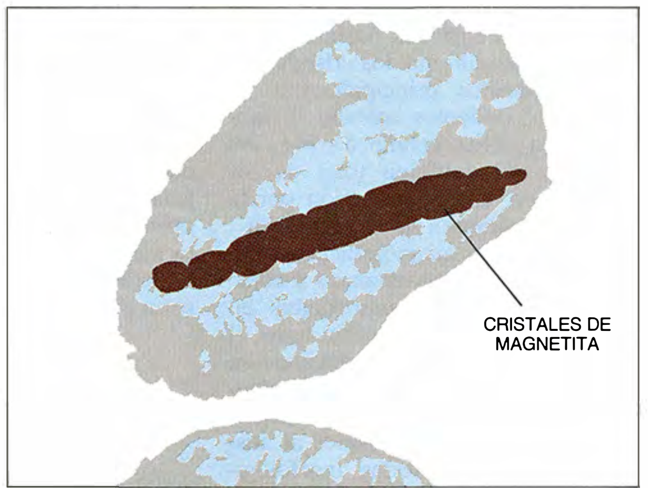
Pero la orientación magnética puede constituir otro mecanismo eficaz para los microorganismos. Desde la óptica de los grados de libertad del movimiento, la magnetotaxia reduce el movimiento a una dimensión, aumentando así significativamente la velocidad de migración.

En resumen, la magnetotaxia puede ser un factor adaptativo en dos aspectos: en primer lugar, propicia un desplazamiento rápido por el medio, hasta el 90 por ciento casi de la velocidad media de la célula. (Piénsese, por mor de comparación, que las células quimiotácticas presentan una velocidad de emigración próxima al 10 por ciento de la velocidad media.) En segundo lugar, la inclinación del campo geomagnético actúa como factor relativo para el organismo sur o norte.

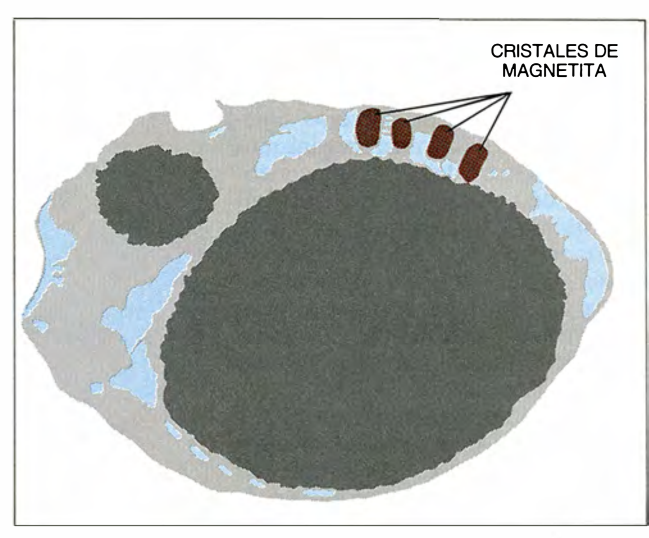
Torres de Araújo y colaboradores, de la Universidad Federal del Ceará, encontraron un alga magnetotáctica del género *Anisonema*, en sedimentos acuosos recogidos cerca del ecuador magnético, en Fortaleza. El descubrimiento corrobora la existencia del fenómeno de la magnetotaxia en los organismos eucariotas. Los autores habíamos descubierto antes un organismo magnetotáctico en las aguas del lago Rodrigo de Freitas, en la ciudad de Río de Janeiro, que, en el análisis de microscopía óptica, presentaba rasgos propios de las algas del género *Chlamidomonas*. Tras renovación de las aguas del lago, promovida por el gobierno para descontaminar el embalse y embellecerlo, nunca más volvimos a observar tales organismos.

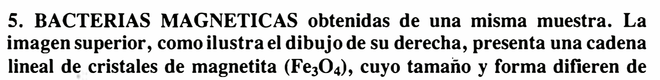
El proceso biológico de precipitación de magnetita en las bacterias comenzó a estudiarse exhaustivamente a raíz de las posibilidades de cultivo, en un medio químicamente definido, de *Aquaspirillum magnetotacticum*, aislada y cultivada por Blakemore. Las células de una variedad no magnetotáctica que acumulaba, sin embargo, hierro pero no fabricaba magnetita y de otra cepa magnetotáctica clonada que acumulaba menos hierro fueron investigadas por Richard B. Frankel y










5. BACTERIAS MAGNETICAS obtenidas de una misma muestra. La imagen superior, como ilustra el dibujo de su derecha, presenta una cadena lineal de cristales de magnetita (Fe_3O_4), cuyo tamaño y forma difieren de los cristales de la fotografía y dibujo inferiores. Esta segunda imagen corresponde a un corte ultrafino, cuya imagen se obtuvo con microscopio electrónico de transmisión; destácanse sus cuatro cristales de magnetita.

colaboradores, entonces en el Instituto de Tenología de Massachusetts. De la comparación, en espectroscopía Mossbauer, de estas muestras sugieren una secuencia de acontecimientos para la biomineralización de la magnetita.

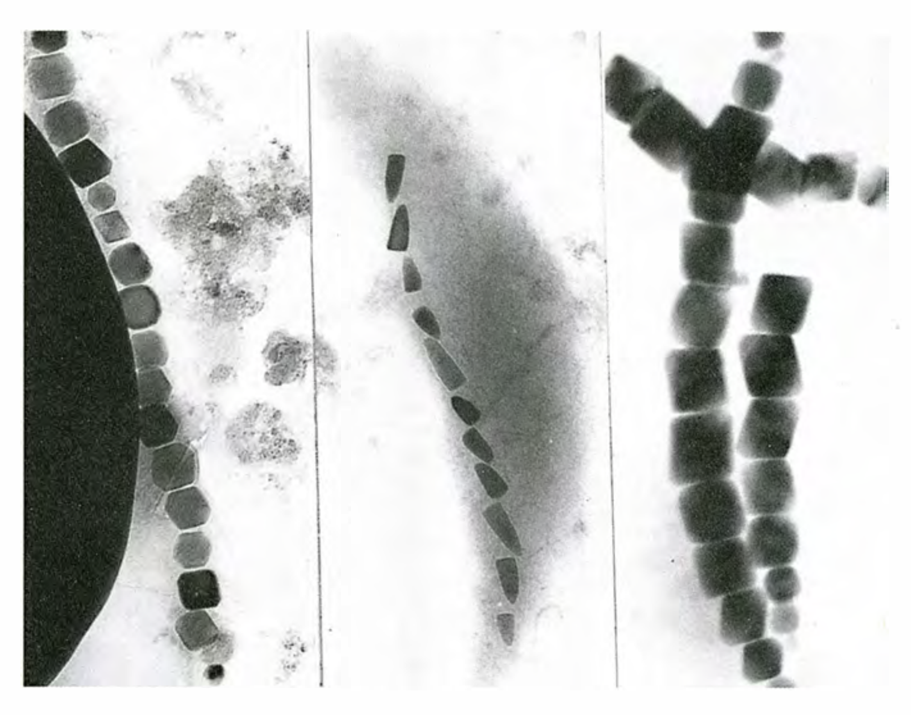
De acuerdo con el proceso propuesto, el hierro entra en la célula en forma de Fe^{3+}, quelato en virtud del ácido químico suministrado al medio de cultivo. Su reducción en Fe^{2+} libera el hierro quelante. El ion Fe^{2+} se vuelve a oxidar y se acumula en forma de óxido de hierro de baja densidad, hidratado. La deshidratación de este óxido de hierro produce ferrihidrita y la deshidratación de ésta, magnetita.

La reducción de la ferrihidrita como precursor de la magnetita habíase demostrado ya en un molusco marino perteneciente al género *Poliplacophora.* Bien pudiera ser que estos procesos de bioprecipitación de magnetita fueran semejantes.

El hierro tiene una gran importancia biológica. Las células lo emplean catalíticamente en la transferencia enzimática de electrones, como en la respiración, en la que el grupo hemo de los citocromos y otras ferroproteínas sin grupo hemo se hallan implicados en la transferencia de electrones a un receptor terminal; o en la fotosíntesis, donde interviene la ferrodoxina y algunos citocromos. Por otro lado, los microorganismos capacitados para fijar el nitrógeno emplean ferrodoxina y otras ferroproteínas sin grupo hemo en la reducción del nitrógeno molecular. Se trata de exigencias catalíticas que ponen de manifiesto el papel nutriente del hierro.

En entornos con *p*H neutro, la forma férrica (3+) precipita de la solución y así, insoluble, no puede ser absorbido por las células. De ahí que determinados microorganismos pudieran haber adquirido la capacidad de sintetizar quelantes que ayuden a captar el hierro férrico en solución o que permitan su retorno a ésta, en cantidades suficientes para garantizar su eficacia nutritiva.

Dentro de ese contexto se inscriben los ensayos de cultivo en medios químicamente prefijados de los microorganismos magnetotácticos. Una de las dificultades reside en la forma química de suministrar el hierro al medio de cultivo para que el microorganismo pueda absorberlo y fabricar magnetita. De momento sólo lo han logrado Blakemore y sus colaboradores con cepas de *Aquaspirillum magnetotacticum.*



6. POLIMORFISMO DE LOS CRISTALES de las bacterias magnéticas. Las imágenes corresponden a muestras obtenidas en un mismo lago, próximo a Río. Todos los cristales son de magnetita.

La estructura cristalográfica de la magnetita es cúbica, en espinela e inversa, con los átomos de Fe^{3+} en celdas octaédricas y tetraédricas, y átomos de Fe^{2+} en celdas octaédricas. El grupo de las espinelas abarca compuestos cuya fórmula general es AB_2O_4, donde A representa metales bivalentes (magnesio, hierro en forma Fe^{2+}, zinc y manganeso) y B metales trivalentes (aluminio, hierro en forma Fe^{3+} y cromo). Las espinelas son óxidos que cristalizan según el sistema cúbico, sobre todo en octaedros.

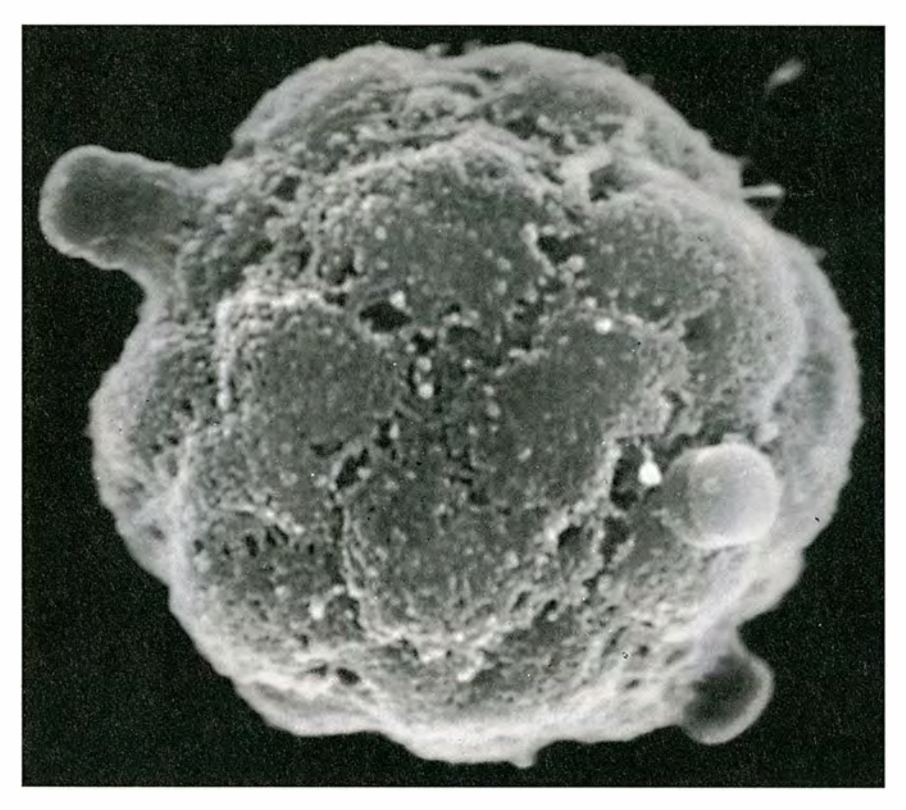
Stephen Mann, de la Universidad inglesa de Bath, demostró que las bacterias del género *Spirillium* magnetotácticas precipitaban la magnetita en forma de prismas octaédricos, truncados por las caras (100) y siendo el momento magnético perpendicular a las caras (111). Observó también que los cristales del interior de bacterias de los géneros *Coccus* o *Diplococcus* eran prismas truncados de base hexagonal, con sus momentos magnéticos apuntando según la misma dirección cristalográfica que en el caso anterior.

En nuestras observaciones descubrimos diversidad de formas cristalinas macroscópicas de la magnetita, asociados por lo común a bacterias de los tipos *Coccus* o *Diplococcus*. La diversidad de organismos se manifiesta en aguas salobres y dulces con mayor claridad que en aguas salinas.

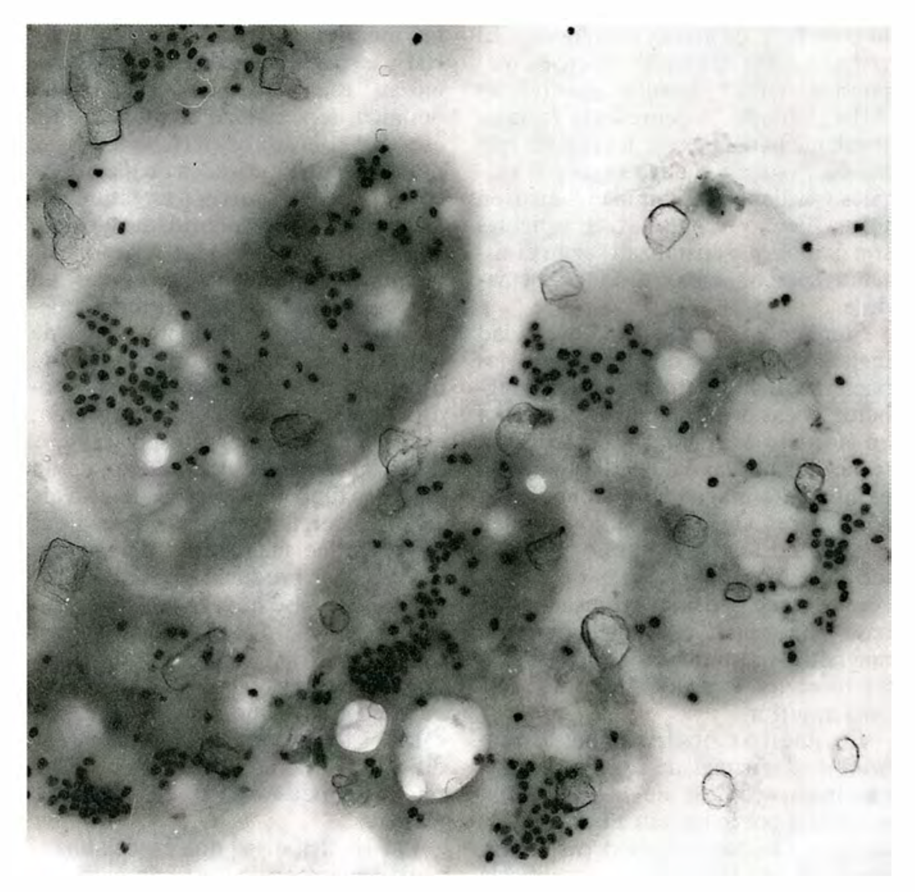
Llegados a este punto, tornemos a la posible existencia de membranas biológicas que ciñen los cristales, y al papel de las mismas. Competería a estas membranas la segregación espacial y el control local del *p*H; funcionarían, asimismo, como una región definida de actividad enzimática. En ese orden, cada especie bacteriana podría producir cristales de magnetita con formas macroscópicas diferentes a tenor de las peculiaridades de esas regiones, consideradas como las membranas de los magnetosomas. La especialización de la membrana determinaría el crecimiento local de unos planos cristalinos en vez de otros. El tamaño de cada cristal podría también, dentro de cierta franja, estar controlado por la especie.

En una muestra proveniente de un lago próximo a la ciudad de Río de Janeiro, descubrimos diferentes tipos de bacterias magnéticas del género *Coccus* que producían cristales prismáticos de base hexagonal, junto con dos franjas de dimensiones muy distintas. Una franja correspondía a cristales de dimensiones de monodominios magnéticos de magnetita (según cálculos teóricos) y la otra correspondía a otro tipo morfológico de bacteria, con dimensiones apreciablemente mayores.

Esa situación se pone especialmente de relieve en los experimentos de aislamiento de cristales. Mientras que los monodominios se agregan como



7. AGREGADO MULTICELULAR MAGNETOTACTICO, obtenido en un lago. Observado al microscopio electrónico de barrido, nos ofrece especializaciones de las células componentes.



8. ALGUNOS INDIVIDUOS COMPONENTES del agregado multicelular, disgregados del conjunto tras someter a éste a un tratamiento especial. Dentro de cada individuo se distinguen múltiples cristales. La imagen ha sido obtenida por un microscopio electrónico de transmisión.

las cuentas de un collar ensartado, los cristales mayores mantienen intacta su estructura catenaria. La observación de estos cristales de dimensiones mayores constituye la primera prueba de la posible existencia de cristales de magnetita con dos dominios o incluso multidominios magnéticos en el interior de los microorganismos.

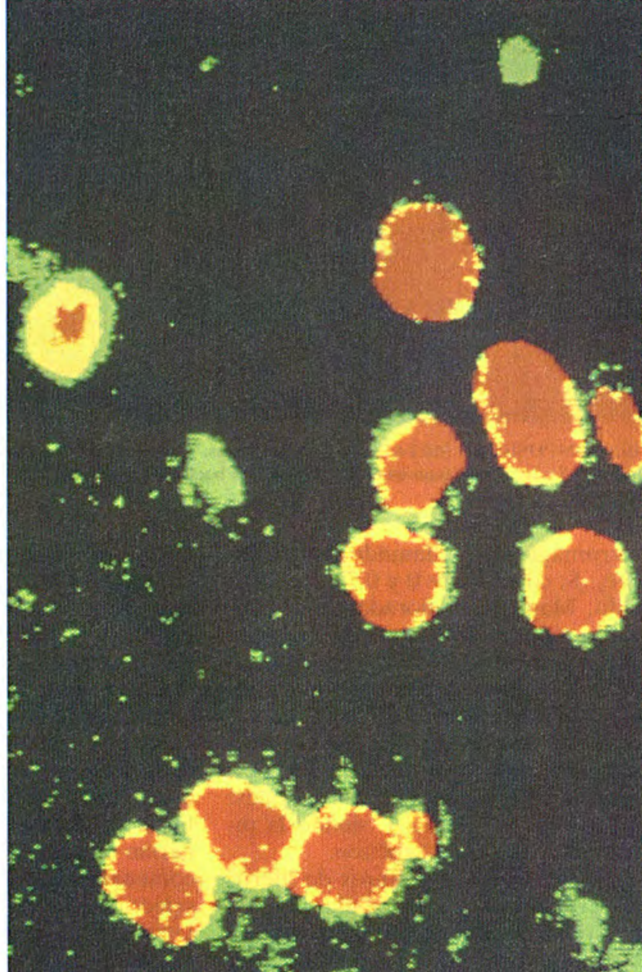
Como se sabe, el momento magnético del monodominio señala en una sola dirección, resultando poco menos que imposible, ni siquiera con la aplicación de campos externos intensos, variar su polaridad sin que lo haga su intensidad.

Se acepta también la presencia de monodominios de magnetita en el seno de las bacterias magnéticas, por motivos sobre todo de selección natural; dicho de otro modo: si la bacteria emplea los magnetosomas para su orientación (lo que parece ser cierto), entonces la selección natural asegura que los tales sean monodominios mejor que cristales superparamagnéticos o multidominios. Las observaciones de cristales mayores pueden abrir nuevas cuestiones en el plano teórico, en el de nutrición bacteriana o que afecten al estado evolutivo del microorganismo y su relación con el campo geomagnético.

Nuestro trabajo se ha desarrollado también en muestras naturales con el propósito de abarcar una amplia diversidad de microorganismos magnetotácticos y estudiar las características de los cristales magnéticos descubiertos en el interior de las células. Desde 1981 hemos observado, además de bacterias magnetotácticas de 1 a 3 micrometros de diámetro, un aglomerado de células procariotas del tipo bacteria gram-negativa que se movía como un solo organismo; el aglomerado presenta un comportamiento característico de los microorganismos de tipo sur. Puede alcanzar hasta 10 micrometros de diámetro y se compone de unas 20 células en íntimo contacto.

No se vio nunca que ninguna célula componente del agregado se moviera por su cuenta; más: el conjunto se mueve como un todo, pero las células que se disgregan del mismo no son capaces de moverse. Tampoco se apreciaron fenómenos de reorganización celular para crear agregados. Los organismos fijos o disgregados presentan orientación pasiva, esto es, las células fijadas se orientan en el campo, señal evidente de que poseen un campo magnético permanente. Al situar esta estructura orgánica bajo el microscopio electrónico, descubrimos que cada uno de sus individuos com-





9. COMPONENTES QUIMICOS DE LOS CRISTALES de un agregado multicelular. La fotografía de la izquierda, obtenida por los autores, corresponde a un corte ultrafino que evidencia los cristales del interior de un agregado magnetotáctico. La imagen espectroscópica electrónica de la derecha, que ha sido procesada por ordenador, nos pone de manifiesto, en color rojo, el elemento hierro y, en color verde, el oxígeno elemental. El interior de los cristales no posee oxígeno y, por consiguiente, no son cristales de magnetita. Sí contiene, por contra, regiones de superposición del oxígeno con hierro (amarillo); en los cristales cortados tangencialmente se comprobó la existencia de una zona con apenas oxígeno (continua en verde).

ponentes puede poseer varias decenas de regiones electrodensas de tipo cristalino en su interior; unos mil cristales posee el organismo en su conjunto.

Estos agregados multicelulares magnetotácticos fueron observados por nosotros en la franja de siete a 27 grados de latitud Sur, a lo largo de la costa brasileña, particularmente en las lagunas costeras. Más tarde se hallaron también en el hemisferio Norte magnético. Ofrecen cierta variación morfológica: lisas, con muchas fibras que semejan flagelos de bacterias o con proyecciones membranoides que recuerdan los pseudópodos de células eucariotas. Es evidente que esas características peculiares bastarían para convertir al agregado en un modelo biológico fascinante. ¿Habrá algún tipo de especialización funcional de las membranas que permita la comunicación de unas células con otras en el agregado? No se han descrito nunca, en los procariotas, funciones a distancia ("gap"). ¿Poseerán alguna diferenciación de funciones los distintos individuos de esta aparente colonia bacteriana? Las preguntas están todavía en el aire. Pero ha comenzado a esbozarse una respuesta en lo concerniente a una cuestión peculiar de sus cristales.

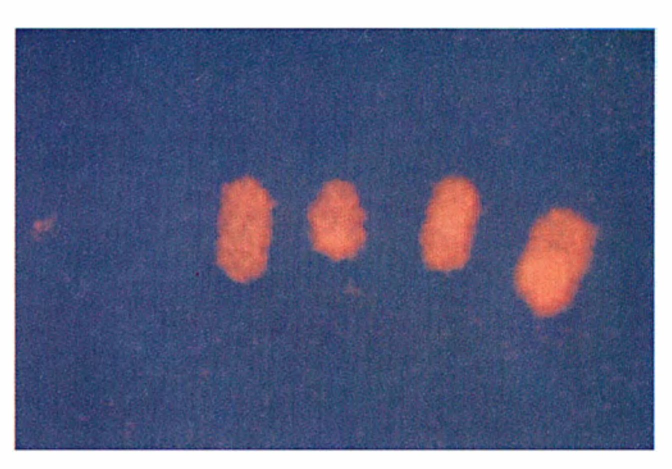
A diferencia de cuantas bacterias magnetotácticas se han descrito hasta hoy, este agregado multicelular magnetotáctico no sintetiza magnetita, puesto que las regiones cristalinas estudiadas no contienen oxígeno; sí hay, por contra, hierro y azufre.

Con el microscopio electrónico podemos obtener un haz electrónico extremadamente colimado y hacerlo incidir sobre las regiones electrodensas, una por una. La región enfocada emitirá rayos X, lo que permite identificar la presencia de hierro y azufre. Gracias a ese mismo ingenio, las técnicas de difracción nos revelan la existencia de una zona fuertemente cristalina en el interior de las regiones electrodensas típicas. Por último, el recurso a la espectroscopía de pérdida de energía de electrones nos ofrecerá una imagen de la distribución del hierro y del oxígeno en cada región electrodensa.

Comprobamos que, a diferencia de los cristales de magnetita, las regiones electrodensas no se comportaban como un monodominio cristalográfico; dicho de otra forma: no eran cristales homogéneos. La zona interior fuertemente cristalina contiene hierro, pero no oxígeno. La misma técnica aplicada a los cristales de magnetita muestra que el hierro y el oxígeno se superponen en las imágenes.

No se pudo obtener la identificación inequívoca de los cristales en cuestión. Mediante estudios de difracción electrónica de innumerables regiones de esas en el interior celular, hemos conseguido una patrón de distribución que se asemeja a un mineral





10. COMPOSICION METALICA de los cristales. En la imagen de la izquierda destaca el oxígeno en el interior de una bacteria magnética; la región cristalina lo posee. La imagen de la derecha corresponde al hierro, en los mismos cristales. La región cristalina tiene, pues, hierro y oxígeno.

ferromagnético llamado pirrotita ($Fe_{1-x}S$, con x entre 0 y 0,2). Por otro lado, Mann y colaboradores identificaron un monocristal de greigita (Fe_3S_4), mineral isomorfo con la magnetita, aunque débilmente magnético. La difracción electrónica de un conjunto de cristales que Man obtuvo fue semejante a la nuestra. Para él, representa una suma de dos cristales: greigita y pirita (FeS_2), siendo la pirita un cristal no magnético.

La presencia de sulfuros de hierro en el interior de la célula plantea cuestiones relativas al metabolismo bioenergético. Las reacciones que precipitan pirita o sulfuros de hierro podrían estar ligadas a unas condiciones primitivas de la atmósfera imbricadas incluso con el origen de la vida, cuando el entorno era anaeróbico.

Este agregado de células, probablemente anaeróbico, se ha encontrado en sedimentos ricos en sulfuros. No parece, empero, que el microorganismo sea muy primitivo, toda vez que sus cristales sí parecen envueltos en membranas biológicas (lo que resultaría una compartimentación típica de los eucariotas) y habida cuenta también de que las células en contacto pueden haber desarrollado alguna especialización (lo que representaría cierto estadio de evolución). Sin que tampoco podamos descartar la posibilidad de que la reacción que precipita sulfuros de hierro constituya una reacción primitiva del tipo de las que acontecen en las archibacterias quimiliolito-autotróficas. La presencia de sulfuros de hierro en los microorganismos magnetotácticos puede, asimismo, guardar relación con su bioenergética y no limitarse a su orientación en el campo geomagnético.

Podemos estar ante organismos que poseen una cadena evolutiva fundada en el azufre. En un principio, el azufre aparecería como fuente de energía de un organismo autotrófico. La pirita (FeS_2), mineral no magnético, surgiría de la formación exergónica a partir de ácido sulfhídrico (H_2S) e iones ferrosos (Fe^{2+}). Esta reacción, propuesta por G. Wachterhauser, de la Universidad de Múnich, viene privilegiada por la insolubilidad de la pirita en bajo pH. Más tarde, los organismos capaces de producir sulfuros de hierro magnéticos predominarían en cuanto el campo magnético comenzara a actuar como factor de selección. R. J. P. Williams, de la Universidad de Oxford, sugiere que los sulfuros de hierro podrían constituir una fuente directa de energía para formas de vida primitivas. Los sistemas vivos primitivos podrían capturar partículas coloidales de hierro como catalizadores y los sensores magnéticos hoy encontrados carecerían de utilidad en un mundo anaeróbico. Al propio tiempo, con la evolución de la biosfera los organismos magnetotácticos representarían una ventaja biológica sobre quienes, aprovechando una misma fuente energética, no ofrecieran una respuesta magnética.

El descubrimiento de la magnetita en bacterias del suelo, realizado por Jörg W. E. Fassbinder y colaboradores, de la Universidad de Múnich, corrobora la hipótesis según la cual el material ferromagnético encontrado en el citoplasma puede guardar relación con una fuente energética, toda vez que en este caso la magnetotaxia no parece constituir ninguna ventaja biológica.

Hay otro aspecto de interés en la existencia de cristales magnéticos en el suelo. La producción biológica de material magnético es responsable, en parte, de los depósitos sedimentarios de magnetita, pirrotita y greigita; contribuye también en la filtración microscópica de Fe y S en la columna de agua.

La magnetotaxia aparece, pues, como un fenómeno nuevo, capaz de plantear cuestiones fundamentales sobre la vida y su adaptación a las condiciones del planeta. La orientación magnética de los microorganismos podrá traer nuevas sorpresas a los campos de la biología, la geología, la física y demás. Demanda un enfoque interdisciplinar, donde el conocimiento se enriquece con la aportación de distintos frentes. En ese sentido, podrían explorarse sus analogías con el viaje de Colón; igual que los microorganismos magnetotácticos emigran siguiendo la información magnética, Colón se orientó también por ese mismo fenómeno, y, a semejanza del marino que descubrió un nuevo mundo con especies desconocidas, los microorganismos magnetotácticos nos revelan un universo fascinante, ignoto aún, capaz de arrojar nueva luz sobre la vida en la Tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAGNETOTACTIC BACTERIA. R. P. Blakemore en *Science*; vol. 190; págs. 377-379; 1975.

OCCURRENCE OF MAGNETIC BACTERIA IN SOIL. Jörg W. E. Fassbinder, Helge Stanjek y Hojatollah Vali en *Nature*, vol. 343; págs. 161-163; 11 de enero de 1990.

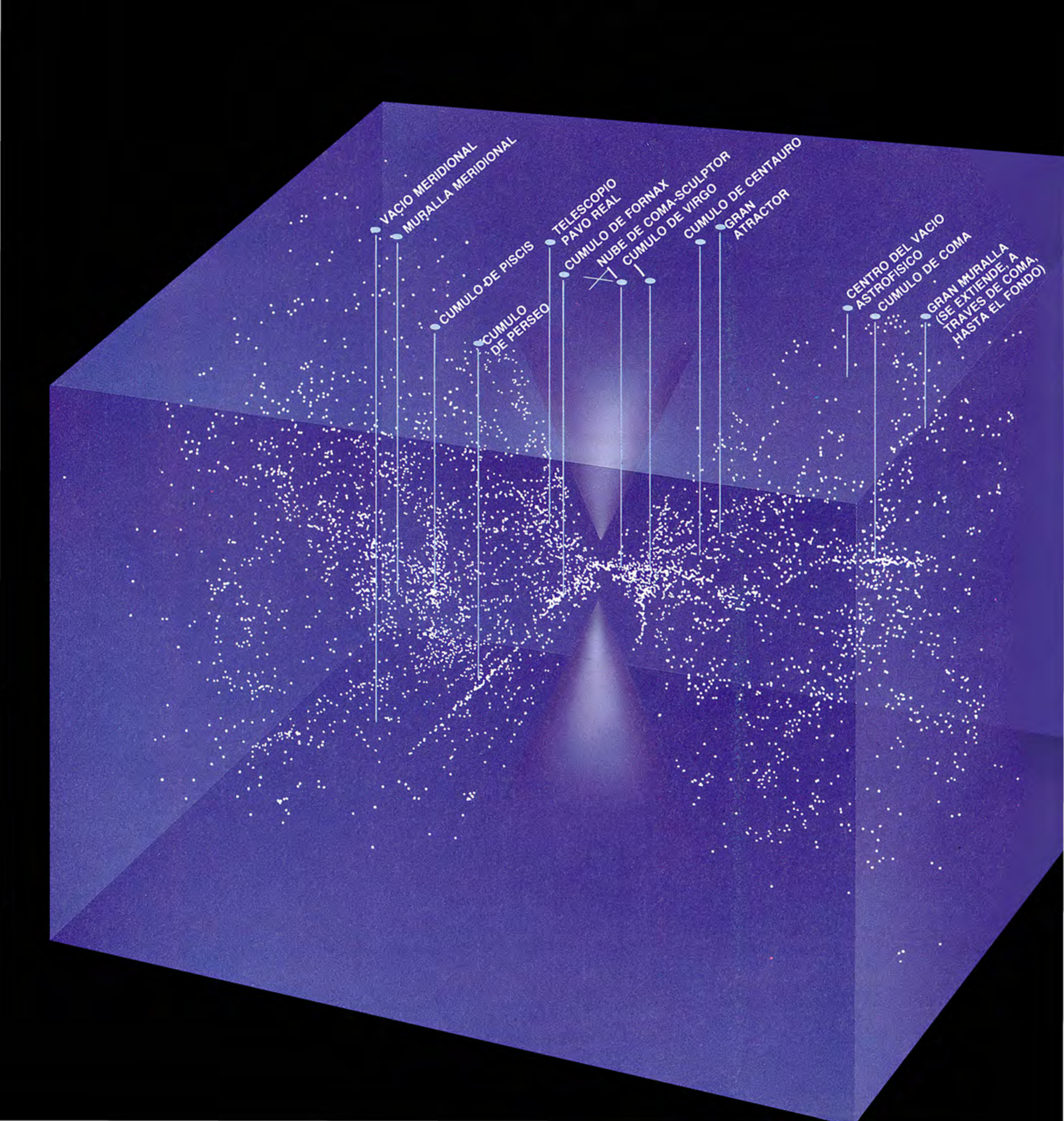
IRON AND THE ORIGIN OF LIFE. R. J. P. Williams en *Nature*, vol. 343; págs. 213-214; 18 de enero de 1990.

MAGNETIC IRON-SULPHUR CRYSTALS FROM A MAGNETOTACTIC MICROORGANISM. Marcos Farina, Darci Motta S. Esquivel y Henrique G. P. Lins de Barros en *Nature*; vol. 343; págs. 256-258; 18 de enero de 1990.

BIOMINERALIZATION OF FERRIMAGNETIC GREIGITE (Fe_3S_4) AND IRON PYRITE (FeS_2) IN A MAGNETOTACTIC BACTERIUM. Stephen Mann, Nicholas H. C. Sparks, Richard B. Frankel, Dennis A. Bazylinski y Holger W. Jannasch en *Nature*; vol. 343; págs. 258-261; 18 de enero de 1990.

Verdades universales

John Horgan



La explicación más ampliamente aceptada del cosmos, el modelo de la materia oscura fría, choca con algunos hechos fríos y duros

UNA REPRESENTACION TRIDIMENSIONAL de 6500 galaxias pone de manifiesto cúmulos de galaxias, vacios y otras macroestructuras del universo local. Las profundidades aproximadas de ciertas estructuras sobresalientes se han proyectado en el plano superior de la representación. La Vía Láctea, que está en el centro del mapa (debajo de la cruz), impide las observaciones de las regiones cónicas sombreadas. La representación, realizada por Changbom Park, de la Universidad de Princeton, para Investigacion y Ciencia, se basa en datos del muestreo de desplazamientos hacia el rojo del cielo del hemisferio Sur, la recogida de datos de Perseo-Piscis y en los análisis del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard. La representación muestra una región de 650 años luz de largo y de ancho y de 450 años luz de profundidad. Un mapa que incluyera los objetos más alejados jamás observados sería unas 50 veces más amplio que éste.

Alguien arrojó arena sobre el proyector de transparencias. En realidad es el universo según Carlos S. Frenk, astrónomo de la Universidad de Durham (Reino Unido). Para ser precisos, se trata de una simulación por ordenador que muestra cómo la gravedad hizo que la materia se condensara tras la gran explosión, el cataclismo que creó el universo hace miles de millones de años.

Cada grano de la transparencia de Frenk representa una galaxia entera, un miniuniverso en sí misma, que contiene miles de millones de estrellas. Frenk, un hombre robusto con acento mexicano, mantiene que su simulación guarda un estrecho parecido con mapas reales de galaxias. "Nuestro modelo", dice, "es capaz de reproducir cualquiera de las macroestructuras observadas".

Frenk está dirigiéndose a un público escogido: una treintena larga de astrónomos y físicos de primera fila. Se han reunido en un refugio de ascetas en un lugar rocoso y subártico al norte de Suecia para un simposio Nobel sobre "el nacimiento y la evolución inicial de nuestro universo". Durante seis días de mediados de junio no harán más que hablar de cosmología, al calor de las barbacoas de reno, durante los paseos por un monte cercano (que un físico bautizó con el nombre de "máximo local") o en las sesiones diarias de trabajo.

Frenk sabe que algunos de estos estudiosos del cosmos se están volviendo cada vez más escépticos sobre la teoría en que basa su simulación. Conocido como el modelo de la materia oscura fría, incorpora la hipótesis desconcertante según la cual por lo menos el 90 por ciento de la masa del universo pertenecería a algún tipo de materia invisible. Todas las estrellas y galaxias que vemos a través de nuestros telescopios son, por así decirlo, la espuma de ese oscuro océano. El modelo es la explicación más ampliamente aceptada de la evolución del universo después de la gran explosión, el "canon" que dirá un físico.

ESCENAS DE UN SIMPOSIO NOBEL

Del 11 al 16 de junio, más de 30 científicos se reunieron en un sobrio lugar del norte de Suecia en un simposio Nobel sobre "el nacimiento y la evolución inicial de nuestro universo". La composición pretende recoger la "cara humana" de los genios: convivencia con gentes del lugar, excursiones a zonas típicas o exhibición de habilidades no tan académicas.



Violinistas suecos, Stephen Hawking y una ayudante



Jim Pe



Genios camino del bosque



John Preskill, Frank Wilcze

Pero recientes observaciones están barrenando el modelo desde dos frentes. Primero, ni las sondas más sensibles del llamado fondo cósmico de microondas —un baño frío (2,7 grados por encima del cero absoluto) de microondas, que se cree que es el débil resplandor de la gran explosión— han revelado por ahora variación regional alguna en su densidad. Los constructores del modelo se ven obligados, pues, a suponer que el universo primitivo era de una excepcional lisura u homogeneidad, con la materia distribuida uniformemente por el espacio. Al mismo tiempo, los mapas del universo nos muestran galaxias cada vez más apelmazadas y rodeadas de espacios vacíos, cada vez también, mayores. Si el universo era tan liso al principio, ¿a qué se debe tanto grumo? Los defensores de la materia oscura fría se afanan con ahínco por dar respuesta a la pregunta.

Un crítico del modelo es P. James E. Peebles, de la Universidad de Princeton. Tan pronto como Frenk se aleja del proyector, Peebles coloca su propia transparencia. En ella aparece una banda densa de galaxias rodeada por algunas solitarias. "No muestro ninguna simulación", informa Peebles; "esto es la realidad: la metrópoli donde reside la Vía Láctea, nuestra galaxia". Peebles señala los grandes espacios vacíos por encima y por debajo de la banda central. "¿Dónde están estos vacíos en tu modelo, Carlos?", pregunta, escrutando a Frenk a través de sus gafas metálicas. "¿Y qué me dices de esto?", replica Frenk, acercándose a la pantalla y señalando las galaxias dispersas. "Prefiero concentrarme en lo otro", dice Peebles, apuntando al vacío mayor.

Un mano a mano cosmológico. Eso era lo que estaban buscando los físicos de la Universidad Politécnica de Chalmers, en Suecia, al organizar el simposio de la fundación Nobel. Cuando Lennox L. Cowie, de la Universidad de Hawai, interpreta sus últimas imágenes de galaxias del cielo profundo, la audiencia le asaetea a preguntas. "Cuando hablas de formación de galaxias te refieres a formación de estrellas, ¿no? ¿Por qué no incluyes el helio en aquella tabla?"

La gran explosión

Lo único que nadie parece poner en cuestión es la premisa subyacente de la cosmología actual: la teoría de la gran explosión. La teoría se apoya en tres datos básicos. En primer lugar, tenemos el descubrimiento de Edwin P. Hubble, astrónomo norteamericano que hace unos 60 años comprobó que la luz de las galaxias se desplazaba hacia el extremo de bajas frecuencias del espectro, el rojo, y lo hacía en proporción a su distancia de nosotros. De la misma manera que el tono grave de la sirena de la policía indica que se aleja de nosotros, también el "desplazamiento hacia el rojo" de las galaxias manifiesta que se hallan en recesión; el hecho de que la velocidad de recesión sea proporcional a la distancia confirma que el universo se está expandiendo. Extrapolando hacia atrás a partir del actual ritmo de expansión, los astrónomos han deducido que la gran explosión tuvo lugar hace 13.000 millones de años, siete mil millones arriba o abajo. Tamaña imprecisión refleja la incertidumbre acerca de las distancias galácticas, la cantidad de masa del universo (que afecta al ritmo de expansión) y otros factores.

El segundo pilar lo constituye el fondo cósmico de microondas, que fue descubierto en 1965 por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson. Finalmente, ahí están las abundancias observadas de los elementos en el universo: el hidrógeno representa unas tres cuartas partes de la masa total, el helio una cuarta parte y trazas de elementos más pesados. Varios físicos han calculado que una gran explosión "caliente" habría acrisolado los elementos precisamente en tales proporciones mediante la fusión nuclear convencional, también conocida como nucleosíntesis.

"La gran explosión goza de buenísima salud", declara David N. Schramm, de la Universidad de Chicago, quien ha desempeñado un papel destacado en el refinamiento de los cálculos de la nucleosíntesis. (Ante las dificultades de la materia oscura fría y de las demás teorías sobre la formación de galaxias, algunos


ebles (izquierda) y Carlos Frenk


Rocky Kolb (izquierda) y Alan Guth



Dave Schramm (izquierda) y anfitriones suecos


k y Gerard 't Hooft


Andrei Linde


Neil Turok

no ocultan su pesimismo por la crisis de la cosmología. Schramm cree, por contra, hallarse en una edad de oro. "Tenemos el marco básico. Tan sólo necesitamos llenar los agujeros", sentencia.)

Pero, ¿por qué el fondo cósmico de microondas es tan suave? ¿Cuánta materia hay en el universo y de qué está hecha? ¿Cómo y cuándo se formaron las galaxias? ¿Se expandirá sin fin el universo? ¿Terminará por colapsarse sobre sí mismo?

Los teóricos han atacado estas cuestiones desde distintos ángulos. Para algunos, galaxias y macroestructuras nacieron de defectos en la fábrica del espacio denominados cuerdas cósmicas, de unos fenómenos similares llamados texturas o de prodigiosas explosiones en el universo primitivo. Otros piensan que la clave de muchas paradojas cósmicas podría residir en una pequeña cantidad de energía que segrega el espacio vacío: la llamada constante cosmológica. La grey que milita en la cosmología cuántica busca las respuestas últimas en el primer instante de la creación, cuando todas las fuerzas de la naturaleza estaban unificadas.

Frenk es uno de los que opinan todavía que la materia oscura fría representa la aproximación más prometedora. Cuando se le aprieta, reconoce que las observaciones recientes han puesto el modelo en un brete y que probablemente deberá revisarse, cuando menos. Y contraataca: las teorías alternativas responden peor a los datos o están en pañales.

Correcto o no, el modelo de la materia oscura fría es una amalgama de ideas de la física de partículas y de la relatividad general sorprendentemente intrépida e imaginativa. Quizá su componente crucial sea la idea de inflación. De hecho, algunos astrónomos lo denominan modelo de la materia oscura fría con inflación.

Guth y las GUT

El lector comprenderá en seguida el titulillo. La hipótesis de la inflación fue propuesta por Alan H. Guth hace una década.

Es éste un fecundo generador, y hábil vendedor, de ideas cósmicas. Tropezó con la inflación mientras exploraba ciertas teorías de gran unificación de la física de partículas. Las teorías, también llamadas GUT, mantienen que la fuerza nuclear fuerte, la fuerza nuclear débil y el electromagnetismo, es decir, todas las fuerzas de la naturaleza salvo la gravedad, se unen en una única fuerza a energías, o temperaturas, extremadamente altas. Estas temperaturas, mucho más allá del alcance de ningún experimento terrestre, habrían existido 10^{-35} segundos después de la gran explosión, durante la llamada era GUT.

La era GUT se acaba cuando la interacción nuclear fuerte se separa de las otras fuerzas y el universo sufre una "transición de fase" parecida a la transformación del agua en hielo. Guth conjeturó que, de la misma manera que el agua se puede superenfriar, permaneciendo en forma líquida por debajo del punto de congelación, así ciertas regiones del universo pudieron también haberse superenfriado en las postrimerías de la era GUT. Las regiones superenfriadas, propuso, entraron en un estado de falso vacío, en el que la gravedad pierde su naturaleza atractiva para convertirse en fuerza repulsiva. Como resultado, las regiones sufren una enorme, aunque breve, expansión, o inflación. Una región, que empezó siendo mucho menor que un protón y acabó un instante después del tamaño de una uva, se convirtió en nuestro universo.

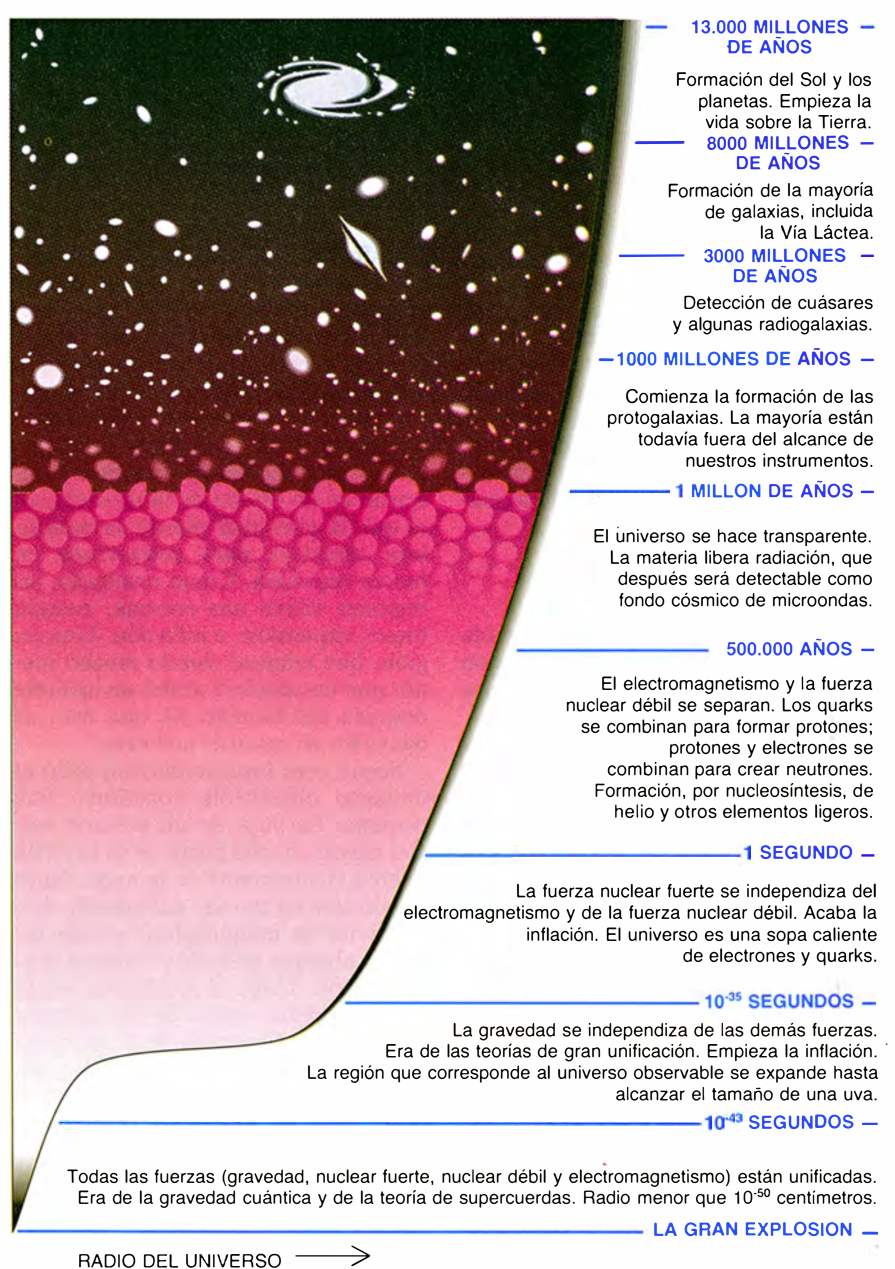
Según esta representación, todo el universo observable constituye una pequeña burbuja en un cosmos mucho mayor; buena parte de su materia se creó virtualmente de la nada. Guth señaló que su teoría, además de desconcertar la imaginación, puede resolver algunos molestos enigmas cosmológicos. Uno, el problema de la homogeneidad, surge de los cálculos basados en el modelo de la gran explosión pre-inflacionario. Los cálculos sugieren que la bola de fuego primordial se expandió demasiado deprisa para que todas sus partes intercambiaran radiación y alcanzaran así el equilibrio térmico. Pero, se preguntan otros cosmólogos, ¿por qué el resplandor de la gran explosión, el fondo de microondas, tiene la misma

temperatura dondequiera que se mida? La inflación, arguye Guth, da una respuesta: la región de la que emergió el universo observable era tan pequeña que ya había alcanzado el equilibrio.

La inflación elimina también el problema de la planaridad. El problema aflora de la teoría de la relatividad de Einstein, que establece que la materia, bajo la influencia de la gravedad, hace que el espacio se curve. Este efecto tiene consecuencias decisivas para un universo en expansión. Si la cantidad de materia por unidad de volumen en el universo (es decir, su densidad de masa) está por encima de cierto nivel "crítico", el espacio se curva sobre sí mismo de tal manera que las líneas paralelas convergen. Y lo que es aún más notable, la gravedad acaba por detener la expansión del universo y provocar su involución hacia un "gran colapso" ("big crunch") —término del que Schramm se atribuye orgullosamente la paternidad—. Un universo así se dice que es cerrado. Si la densidad de masa cae por debajo del valor crítico, las líneas paralelas divergen y el universo se expande sin fin: es abierto. Si la densidad alcanza exactamente el valor crítico, el universo se mantiene en expansión, pero a un ritmo cada vez más pequeño. Esto se conoce como un universo plano, ya que el espacio no tiene curvatura: las líneas paralelas se comportan tal como había descrito Euclides y como parecen hacerlo en nuestro mundo.

Varios cosmólogos habían señalado antes de la inflación que la manifiesta planaridad del universo, e incluso su propia existencia, representaba una extraordinaria coincidencia. Si el universo hubiera tenido un poco más de materia que la que tiene, tiempo ha que se hubiera colapsado; un poco menos de materia, y se hubiera separado demasiado deprisa para que se hubieran podido formar las estrellas y las galaxias. Lawrence M. Krauss, de la Universidad de Yale, ha comparado las posibilidades de que el universo tuviera la densidad de materia correcta con las posibilidades de que alguien acertara *exactamente* cuántos átomos hay en el Sol. ¿Por qué fuimos tan afortunados?

CRONOLOGIA DE LA GRAN EXPLOSION



Inflación para todo

De nuevo, la inflación proporciona una respuesta. De la misma manera que hinchar una pelota de playa hasta 1000 veces su tamaño normal haría que un observador cercano viese su superficie más plana, plantea Guth, la inflación aplanaría la región del universo que podemos observar. En tal universo plano, la densidad de materia sería la crítica.

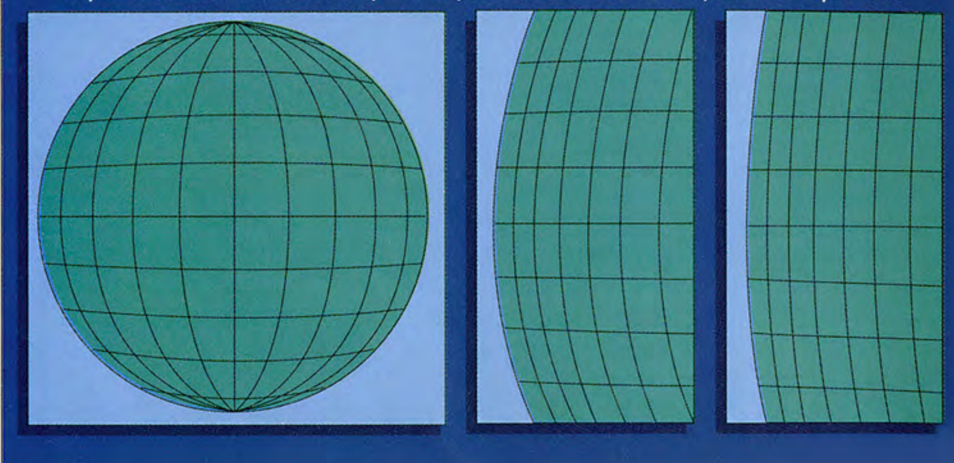
Enigmas como el de la homogeneidad y el de la planaridad han llevado a algunos cosmólogos a invocar el principio antrópico: el universo es como es porque si no lo fuera no estaríamos aquí para observarlo. Pero la mayoría de científicos consideran que el principio antrópico es tautológico y acientífico. "Cuando se recurre al principio antrópico", dice Schramm, "se está diciendo que no se sabe resolver el problema". No sorprende, pues, que muchos teóricos abrazaran la inflación como el desarrollo más importante desde la teoría original de la gran explosión. No sólo resuelve los problemas del horizonte y de la planaridad, sino que también predice la cantidad de materia del universo y su destino final.

La inflación aporta incluso una explicación para la formación de las galaxias. Según la física cuántica, cualquier campo de energía fluctúa constantemente en intensidad a nivel subatómico, de la misma manera que las olas rizan la superficie de un lago. Los picos creados por estas fluctuaciones cuánticas en el universo primitivo habrían crecido tanto, en virtud de la inflación, que pudieron servir de semillas de estrellas y

galaxias. La gravedad habría hecho el resto.

Aunque la inflación resuelve algunas cuestiones muy importantes, plantea otras. ¿Dónde está toda la materia? La teoría de Guth predice que la densidad de materia en el universo debería ser la crítica, pero cuantas mediciones se han realizado se han quedado cortas.

Los análisis de la materia luminosa visible arrojan una densidad de masa de sólo un 1 por ciento del valor crítico. Los estudios de los movimientos de las estrellas en el interior de las galaxias han elevado las estimaciones de la densidad total. Las observaciones indican que las galaxias deben contener una masa diez veces mayor de lo que aparentan, pues de lo contrario se desintegrarían. Los análisis de los movimientos de las galaxias que orbitan en cúmulos de galaxias han llevado a la misma conclusión.



Falta materia

Estos hallazgos, conocidos desde hace unas décadas, marcaron el inicio de la búsqueda de "la materia perdida". Ahora bien, las estimaciones revisadas de las masas galácticas y de los cúmulos sólo elevaron la densidad de masa total hasta un 10 por ciento aproximadamente del valor crítico. Además, una hipótesis clave de los cálculos de la nucleosíntesis de la gran explosión, que con tanto éxito explica las proporciones de los elementos ligeros en el universo, es que los bariones (clase de partículas que engloba neutrones y protones y da cuenta de la mayor parte de la materia ordinaria, de la que están hechas las estrellas, planetas y personas) *no pueden superar* el 10 por ciento de la densidad crítica. Más bariones hubieran producido más helio.

La implicación de esta afirmación es profunda. Los astrónomos sospecharon en un comienzo que la materia oscura era materia bariónica ordinaria empaquetada en formas difíciles de detectar: cometas, planetas, estrellas débiles llamadas enanas pardas, agujeros negros e incluso galaxias enteras cuyo tenue brillo impedía su observación. Pero si son correctos ambos elementos (inflación y cálculos de la nucleosíntesis), entonces al menos el 90 por ciento de la materia del universo debe estar amasada con partículas no bariónicas. Además, las partículas tienen que interaccionar muy débilmente con la materia ordinaria, pues de lo contrario no sería tan oscura (difícil de detectar).

El principal inculpado en el asunto de la materia oscura era una partícula no bariónica "caliente" (rápida): el neutrino. Aunque se producen abundantemente en varias reacciones nucleares, los neutrinos interactúan débilmente; pueden atravesar la Tierra sin inmutarse. Lo mejor de todo ha sido descubrir su existencia, desde que se detectó una de las tres clases conocidas en 1956.

Los modelos dominados por neutrinos, o de "materia oscura caliente", presentan dos problemas. Primero, tras años de experimentos no se ha logrado demostrar que esas partículas posean masa, aunque sólo fuera la suficiente para frenar la expansión del universo. Los datos iniciales de un nuevo detector de neutrinos muy sensible, conocido como el "Experimento soviético-americano de galio", han avivado las esperanzas de los entusiastas de la materia oscura caliente, confiados en la resolución pronta del problema; los datos sugieren que el Sol emite muchos menos neutrinos de lo que predice el modelo estándar de la física de partículas; una manera de resolver esta discrepancia consiste en asignar masa a una de las clases de neutrinos. El segundo problema permanece sin resolver: según las simulaciones de ordenador, los neutrinos rápidos habrían tardado demasiado en establecerse en galaxias.

La banda de los cuatro

Los problemas de los modelos de materia oscura caliente hicieron que los teóricos volvieran su mirada hacia la materia oscura lenta, o fría, que presumiblemente se agruparía con más facilidad. Peebles escribió el primer artículo sobre materia oscura fría con inflación en 1982, pero más tarde se volvió escéptico: el modelo tenía "demasiados problemas".

Mediados los ochenta, Frenk, Marc Davis, de la Universidad de California en Berkeley, Simon D. M. White, de la de Arizona, y George Efstathiou, de la Universidad de Oxford, comenzaron las simulaciones en computador, basadas en el modelo de la materia oscura fría, que parecían reproducir las actuales observaciones de la distribución de galaxias. La banda de los cuatro, como se la llamó, abanderó la causa de la materia oscura fría y, en sus manos, la teoría se convirtió en la principal explicación de la formación de las galaxias.

El no haber detectado nunca partículas oscuras frías estables se admitía como un reto, no como un fallo fatal. Después de todo, los físicos de partículas, en sus esfuerzos por hilvanar una teoría de gran unificación, habían postulado un montón de partículas hipotéticas que mediaban en las interacciones. Una de las partículas, especulaban los cosmólogos, podía existir aún como una "reliquia" de la era GUT, en abundancia suficiente como para dar cuenta de la masa perdida.

Michael S. Turner, de la Universidad de Chicago, propone "reliquias cosmológicas de 100 kilogramos" como candidatos; la transparencia que muestra ofrece objetos oblongos. Más plausibles parecen los axiones y las partículas supersimétricas ligeras, o PSL. Los axiones son partículas relativamente ligeras postuladas para resolver problemas de ciertas GUT. Las PSL son los retoños de una teoría llamada supersimetría, que mantiene que todas las partículas identificadas hasta ahora tienen gemelas.

Los físicos de partículas se han uni-



INSPECCION DE DOS MILLONES DE GALAXIAS realizada por astrónomos de la Universidad de Oxford. Detectaron agrupaciones a escalas mucho mayores que lo que predecía el modelo de la materia oscura fría. La imagen grande consta de miles de pixeles, cada uno de los cuales corresponde a una fotografía de un trozo distinto del cielo. Los pixeles son negros, grises o blancos en función del número de galaxias que contenga la placa: ninguna, entre 1 y 20, o más de 20, respectivamente.

do con los cosmólogos en la búsqueda del candidato a la materia oscura fría. John Ellis, del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, dice que encontrar una partícula así representaría una gratificadora extensión de la revolución copernicana. "No sólo no estamos en el centro del universo", señala Ellis, "puede que ni siquiera estemos hechos de la misma pasta la mayor parte del resto". Pero todos los experimentos, también los del CERN, han descartado algunos candidatos (tal es el caso de un neutrino frío muy masivo) y han indicado que otros, como son las PSL, podrían habitar en regiones energéticas fuera del alcance de los aceleradores actuales, según Krauss.

El modelo de la materia oscura fría plantea otros problemas. Por ironía de las cosas, una de las principales preocupaciones estriba en el fondo cósmico de microondas, sólido punto de apoyo hasta ahora de los cosmólogos. Su uniformidad en todas las direcciones, o isotropía, constituía una auténtica piedra angular, prueba del origen primigenio de la radiación. Pero el modelo de la materia oscura fría predice que las fluctuaciones responsables de las galaxias y de las estructuras aún mayores deberían haber dejado una huella, en forma de variaciones locales de temperatura, en la radiación de microondas.

Huella que está por descubrir. Las mediciones del *Explorador del fondo cósmico* (COBE), que se lanzó el año pasado, ha sondeado la radiación llegando hasta una resolución de una parte en 10.000, sin encontrar ninguna variación local de intensidad. Estos datos son el límite de lo permisible para el modelo de la materia oscura fría. George F. Smoot, de la Universidad de California en Berkeley, miembro del equipo COBE, sospecha que los nuevos datos mostrarán que la radiación es suave, incluso a mayor resolución. Las mediciones del fondo de microondas desde un observatorio del Polo Sur, que escruta una región más pequeña del cielo que el COBE, aunque capaz de una mayor resolución, tampoco han revelado ninguna inhomogeneidad.

Observaciones incómodas

Al mismo tiempo, las observaciones, cada vez más numerosas, han demostrado que la distribución de galaxias es cualquier cosa menos suave. A mediados de los años ochenta, un grupo dirigido por Margaret J. Geller y John P. Huchra, del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard, empezó a cartografiar las posiciones de las galaxias analizando sus desplazamientos hacia el rojo, proporcionales a la distancia, como demostró Hubble, y encontró que tendían a agruparse en gigantescos filamentos y láminas. Otro equipo del mismo centro halló pruebas de la existencia de una gran región vacía en la dirección de la constelación del Boyero, uno de los muchos vacíos identificados hasta el momento. Para algunos astrónomos, la Vía Láctea y muchas de las galaxias próximas estarían precipitándose hacia una descomunal masa sin identificar: el Gran Atractor.

Dos informes del año pasado han exacerbado la situación. Geller y Huchra afirman haber descubierto la mayor estructura jamás identificada: la Gran Muralla, una banda de galaxias de 500 millones de años luz de espesor, por lo menos. Thomas J. Broadhurst y sus colaboradores, de la Universidad de Londres, han sondeado dos estrechos "testigos" de espacio y han hallado densos glóbulos de galaxias alternando con vacíos de unos 400 millones de años luz de espesor a lo largo de varios miles de millones de años luz. Geller, y como ella otros, mantiene que ni la materia oscura fría ni ningún otro modelo puede explicar las nuevas observaciones: por la sencilla razón de que no ha habido tiempo suficiente para que la gravedad creara estructuras del tamaño de la Gran Muralla a partir de las pequeñas fluctuaciones de densidad compatibles con el fondo de microondas. Ni el grupo de Geller ni el de Broadhurst están representados en la reunión de Suecia. Sus informes reciben un severo vapuleo.

Los participantes en la conferencia parecen más impresionados con la muestra recogida por astrónomos de Oxford. El grupo no representó las distancias de las galaxias individuales calculadas a partir del desplazamiento hacia el rojo; sí analizaron, por contra, muchas más galaxias. Mientras los análisis previos sólo englobaban unos pocos miles de galaxias de regiones estrechas, el grupo de Oxford ha escrutado dos millones de galaxias de una dilatada zona del cielo.

"Hemos encontrado pruebas de agrupamientos a escalas por lo menos dos veces mayores de lo que predicen los modelos de materia oscura fría", informa Efstathiou, uno de los participantes en el muestreo de galaxias. Y añade: "El modelo de la materia oscura fría debe revisarse o descartarse." La audiencia parece desconcertada. Efstathiou derrama una gota fría de racionalidad; él también pertenece a aquella banda de los cuatro que originó el modelo de la materia oscura fría. "Es como si el Papa se hiciera judío", dice alguien.

Otro conjunto de observaciones —que muestran objetos muy alejados, y por tanto muy viejos— es también preocupante. El modelo de la materia oscura fría predice que la mayoría de galaxias tardan miles de millones de años en formarse; muy pocas, pues, deberían encontrarse a distancias superiores a los 10.000 millones de años luz (suponiendo que el universo tenga 13.000 millones de años). Pero más allá de dicho límite

se han encontrado centenares de cuásares, puntos extraordinariamente brillantes de ondas luminosas y de radio. Muchos están convencidos de que tales objetos son galaxias con núcleos hiperactivos.

Puesto que los cuásares aún no se conocen muy bien, se concede mayor peso a los objetos que son, sin ninguna duda, galaxias. Se han identificado algunas a más de 10.000 millones de años luz de distancia; media docena de ellas están a más de 11.000 millones de años luz de distancia. Se trata, en su mayoría, de radiogalaxias: galaxias elípticas con "chorros" gigantescos que emiten ondas de radio. Estas observaciones no invalidan el modelo de la materia oscura fría, dice Kenneth C. Chambers, del Observatorio de Leiden, estudioso de las galaxias lejanas. "Pero si encontramos muchas más como ellas, el modelo pasará apuros."

Cosas que explotan

Con anterioridad a la última ronda de observaciones, los teóricos habían ya empezado a ofrecer mecanismos alternativos de creación de galaxias y de organización de las mismas en macroestructuras. Nadie, sin embargo, se ha erigido en líder del modelo de la materia oscura fría. Una hipótesis, desarrollada por Alexander Vilenkin, de la Universidad de Tufts, y otros son las cuerdas cósmicas. Las cuerdas cósmicas se han comparado con los defectos cristalinos que aparecen entre las distintas regiones de un estanque que se hayan congelado en instantes diferentes. De la misma manera, se pueden haber formado defectos en la topología del espacio al tiempo que se enfrió el universo primitivo. Tales defectos, calculan los teóricos, podrían haber poseído masa suficiente para formar galaxias e incluso cúmulos galácticos. Pero recientes investigaciones sobre las cuerdas apuntan que quizás fueron demasiado pequeñas e inestables para crear galaxias. "La imagen ha perdido el encanto del principio", dice Thomas W. B. Kibble, de Londres.

Un destino similar han sufrido las propuestas de Jeremiah P. Ostriker, de Princeton, y otros, que incluían explosiones en el universo primitivo. Las estrellas que explotan, las supernovas, podían haber desencadenado la formación de galaxias, según Ostriker; las explosiones de cuerdas cósmicas podrían haber forzado a las galaxias a agruparse en cúmulos. Muchos teóricos, él incluido, piensan que tamañas explosiones, necesarias para crear grandes cúmulos y vacíos, deberían haber dejado su impronta en el fondo de microondas cósmico.

Hay una visión alternativa para la formación de estructuras cuya popularidad no ha decaído. Texturas de nombre, las desarrolló en los dos últimos años un joven profesor de Princeton, Neil G. Turok. Las texturas se parecen a las cuerdas cósmicas, con la peculiaridad de que se trata de defectos locales, en forma de nudos, y mucho más fáciles de modelar en un computador. Kibble encuentra las texturas "bastante atractivas", pero advierte que también las cuerdas cósmicas y las explosiones parecían prometedoras. "Cuanto más profundizas", observa, "más problemas se encuentran".

La buena fortuna del modelo de la materia oscura fría tiene que ver con la flexibilidad que le han conferido sus defensores. Suponen, por ejemplo, que las galaxias presentan una imagen sesgada, o poco exacta, de la distribución de materia oscura; así, reordenan la materia a voluntad. El problema de esta idea, conocida como sesgo, es que añade, al modelo, "parámetros libres" (variables que pueden ajustarse arbitrariamente). Los parámetros libres facilitan el ajuste de las observaciones, dice Peebles, pero también hacen que el modelo sea "menos predictivo y sólido".

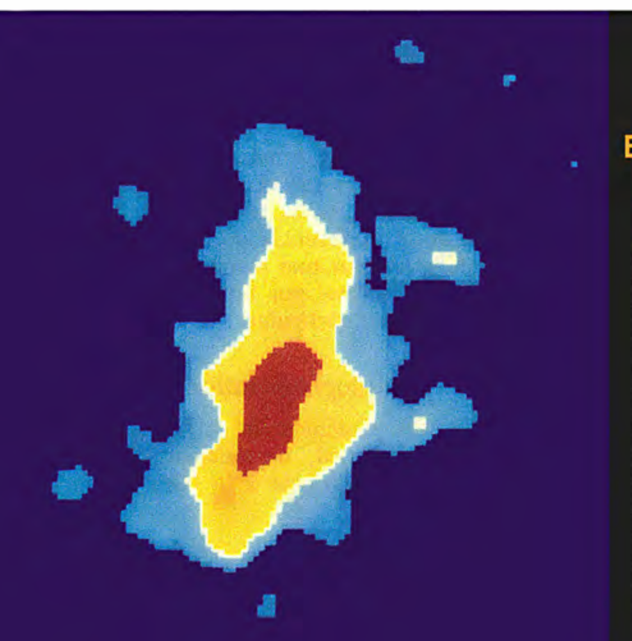
Los teóricos también han propuesto modificaciones a la inflación que pueden dar lugar a macroestructuras. Alexei A. Starobinsky, del Instituto L. D. Landau de Moscú, ha sugerido que la inflación podría ocurrir en varias etapas, o "pasos", y Paul J. Steinhardt, de Pennsylvania, ha avanzado una versión, llamada inflación generalizada, en la que varía la intensidad de la gravedad.

Quizás el teórico inflacionario con mayor garra imaginativa sea Andrei D. Linde. Estrechamente asociado a la hipótesis desde 1982, cuando resolvió con destreza problemas teóricos que surgían en la formulación original de Guth, ha propuesto desde entonces un sinfín de nuevas formas de inflación, incorporando axiones, cuerdas cósmicas, neutrinos, texturas y otros conceptos hipotéticos. A diferencia de la mayoría de los cosmólogos, no se asusta de invocar el principio antrópico. "Hay muchas posibilidades extrañas", dice.

Pero otros cosmólogos están cada vez más frustrados por la mutabilidad de la inflación. Peebles, por ejemplo. Frank Wilczek, físico de partículas del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, comenta: "Necesitamos modelos de inflación más específicos y comprobables."

El mayor patinazo de Einstein

Los que apuestan sobre el resultado de todo este juego teórico no deben olvidar una carta escondida: la constante cosmológica. La expresión, inventada por Einstein a comienzos de siglo, remite a la energía que re-



LAS IMAGENES DE LAS GALAXIAS LEJANAS PONEN EN UN APRIETO A LOS TEORICOS

La galaxia más alejada identificada hasta ahora fue descubierta por Kenneth C. Chambers y George K. Miley, del Observatorio de Leiden (*izquierda*). Está a casi 12.000 millones de años luz de distancia. Los teóricos no tienen respuesta fácil para explicar la formación de galaxias en una fase tan precoz después de la gran explosión. La imagen de la derecha, realizada por Lennox L. Cowie, de la Universidad de Hawai, y otros, que muestra un campo de galaxias situado a unos 5000 millones de años luz, plantea un problema distinto. Las galaxias parecen abundar más que en las regiones cercanas. ¿A qué se debe esa distribución dispar?



AQUI UN UNIVERSO, AQUI OTRO...

Los cosmólogos andan siempre preocupados por ubicarnos. No contentos con decirnos que nuestro Sol es una estrella más entre miles de millones que componen la Vía Láctea que, a su vez, es una entre miles de millones de galaxias del universo, algunos pretenden convencernos de que éste es sólo uno más entre un sinfín de ellos. Existen varias teorías de "multiversos". Aunque todas tienen algo que ver con la física cuántica y proponen imágenes parecidas, difieren en aspectos importantes.

Teoría de muchos mundos. Hugh Everett III, de Princeton, propuso esta teoría hace más de 30 años para resolver cuestiones relativas al papel del observador en la física cuántica. Según ésta, una partícula, un electrón por ejemplo, parece seguir simultáneamente varias trayectorias, pero cuando un físico observa al electrón encuentra que sólo sigue una. Preocupado por la manera arbitraria en que se eliminan las trayectorias alternativas, Everett propuso que el electrón seguía en realidad todas las trayectorias, si bien lo hacía en universos diferentes.

Teoría de muchas historias. James B. Hartle, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Murray Gell-Mann, del Instituto de Tecnología de California, han generalizado el concepto de Everett a todo el universo. Inmediatamente después de la gran explosión, explica Hartle, el universo era tan pequeño que podía considerarse una partícula subatómica que siguiera trayectorias distintas. Hartle prefiere la palabra "historias" a "mundos" y, a diferencia de Everett, imagina las trayectorias alternativas como potenciales en vez de reales.

Inflación caótica. El físico soviético Andrei D. Linde supone que, cuando el universo tenía 10^{-35} segundos, era una espuma caótica; regiones distintas tenían propiedades físicas diferentes y sufrieron la inflación, breve aunque inmenso crecimiento súbito, en tiempos distintos. Después de la inflación, las regiones están separadas por distancias ingentes, mucho más allá de las influencias mutuas. La verdad es que son cosmos separados.

Agujeros de gusano. Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, Sidney R. Coleman, de la de Harvard, y otros sugieren que lo mismo que los electrones pueden sufrir repentinamente el efecto "túnel" saltando de un punto a otro, así ocurre con el espacio-tiempo. El efecto túnel del espacio-tiempo crea agujeros de gusano, que pueden conducir hacia otros puntos del mismo universo, hacia callejones sin salida conocidos como universos bebé e incluso hacia otros universos tan grandes como el nuestro.

Universos a medida. Alan H. Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, aboga por la posibilidad de crear un universo en el laboratorio. Apenas se requeriría poco más que un trozo de materia del tamaño de un balón, apunta. La parte difícil sería comprimir la materia hasta densidades parecidas a las de un agujero negro y entonces hacer que se expandiera, igual que hizo el universo cuando tuvo lugar la gran explosión. "Me gusta pensar en esto como un problema de ingeniería", señala Guth, "factible por alguna civilización futura".

side en un vacío perfecto. Einstein había supuesto que la energía del vacío, que crearía una especie de "presión" hacia afuera en el espacio, podría necesitarse para contrarrestar la fuerza hacia dentro de la gravedad en un universo estático, que no estuviera en expansión. Einstein abandonó la idea después del descubrimiento de la expansión del universo (se ha llegado a decir que lo consideraba su "mayor patinazo").

Cowie cree que una constante cosmológica podría ayudar a explicar las imágenes de galaxias del espacio profundo que ha tomado recientemente. Estas imágenes sugieren que el número de galaxias era varias veces mayor hace unos cinco mil millones de años que en la época actual. ¿Qué pasó con las galaxias?

Cowie señala que muchas de ellas podrían haberse fusionado o debilitado hasta el punto de que no se vean, pero prefiere otra explicación: la constante cosmológica. Una pequeña energía del vacío podría distorsionar nuestra visión del espacio, haciendo que subestimáramos su volumen a escalas muy grandes. Este efecto, dice Cowie, podría explicar por qué aparecen tan apelmazadas las galaxias en las imágenes del espacio profundo.

De manera parecida, la constante podría eliminar una embarazosa discrepancia entre la edad de los cúmulos globulares (densos nudos de estrellas afincados cerca del centro de la Vía Láctea) y la edad del universo. Del análisis espectral de las estrellas de los cúmulos globulares se infiere que tienen más de 15.000 millones de años, mientras que las estimaciones de las distancias de las galaxias y su velocidad de recesión han llevado atribuir al universo que sólo tiene 13.000 millones de años. Una pequeña energía del vacío habría inducido a subestimar el volumen total y con ello la edad del universo.

Por último, una constante cosmológica podría explicar por qué el universo parece tan plano, incluso a pesar de que la densidad de masa manifiesta esté muy por debajo del nivel crítico. Como en cierto sentido la energía y la masa son equivalentes, la energía del vacío podría contabilizarse como masa perdida.

La constante cosmológica no arrastra en masa a los teóricos, quienes lamentan su "fealdad" al introducir otro parámetro libre más en los modelos, en detrimento de su predictividad. Además, nadie ha explicado la razón de la preferencia que muestra la naturaleza por una constante cosmológica positiva, por no hablar ya de un valor en particular.

Cosmología cuántica

Sidney R. Coleman, de la Universidad de Harvard, ha calculado la constante cosmológica y la cifra en

cero. Al igual que las partículas subatómicas pueden saltar de un punto a otro mediante el fenómeno cuántico de efecto túnel, así hacen también el espacio y el tiempo. El efecto túnel del espacio-tiempo crea "agujeros de gusano" que comunican nuestro universo con otros universos de manera que la energía del vacío se anula.

El pronunciamiento de Coleman acerca de la constante cosmológica es uno de los resultados concretos que surgen de la cosmología cuántica. Esta exótica rama de la física estudia los primeros 10^{-43} segundos de la creación, cuando el universo era tan pequeño, denso y caliente, que la gravedad y los efectos cuánticos, que pertenecen a ámbitos distintos, habrían estado en estrecha relación. Incluso las teorías de gran unificación acaban mucho antes de esta era, pero algunos esperan iluminarla desarrollando una teoría de la gravedad cuántica, la teoría de todo, que une las fuerzas de la naturaleza.

Uno de los más aventurados exploradores de la cosmología cuántica es Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge. "Al integrar los agujeros de gusano se llega a parámetros alfa que constituyen un campo cuántico en el superespacio", afirma. Hawking, cuyo trabajo sirvió como pista de lanzamiento para el ataque de Coleman contra la constante cosmológica, piensa que los "pasillos de gusano" pueden llevar finalmente a una teoría de la gravedad cuántica. Otros lo dudan. Gerard 't Hooft, de la Universidad de Utrecht, piensa que los agujeros de gusano violan principios de causa y efecto que son fundamentales en la física.

Entre la botánica y la filosofía

Otra aproximación a la gravedad cuántica involucra a las supercuerdas. Las supercuerdas, que no deben confundirse con las cuerdas cósmicas, son partículas hipotéticas que tienen longitud pero carecen de anchura y que oscilan hasta en 26 dimensiones. Los que las proponen dicen que estas oscilaciones pueden dar cuenta del comportamiento de todas las partículas observadas. Pero otros físicos replican que la teoría matemática, muy complicada, debe comprobarse a energías más bajas, en el dominio al alcance de los aceleradores de partículas, antes de que sea aceptada como una descripción viable de la creación del universo. "La teoría de cuerdas aún es prometedora", opina Wilczek. Esto también sirve para toda la cosmología cuántica, añade. "Son sanos intentos, pero podrían ser todos incorrectos."

Turner, de la Universidad de Chicago, aplaude estos esfuerzos teóricos, pero predice que el futuro de la cosmología estará dominado por las observaciones. Los "días alegres de la cosmología", en los que las especulaciones teóricas no se comprobaban con datos, se han acabado, dice. Pero espera que las teorías sirvan de guía a los experimentos. "Si todo lo que tienes son observaciones, sería botánica", dice. "Si todo lo que tienes es teoría, sería filosofía."

Turner señala que, a pesar de la impresión que se saca de los informes presentados sobre la macroestructura, la mayor parte del universo observable sigue sin cartografiar. La situación podría mejorar gracias a un proyecto conjunto de Chicago y Princeton para cartografiar las posiciones de un millón de galaxias y de varios centenares de miles de cuásares hacia finales de siglo. Dentro de unos años el *Telescopio espacial Hubble*, si se ajusta, podría revelar la estructura detallada de las galaxias y los cuásares alejados; el radiotelescopio que se está actualmente construyendo en la India podría remontarse más hacia atrás, hasta detectar los embriones de las galaxias.

Otros experimentos podrían aclarar el misterio de la materia oscura. El grupo dirigido por J. Anthony Tyson, de los Laboratorios AT&T Bell, está analizando el espacio profundo en busca de objetos cuyas imágenes hayan sido distorsionadas —curvadas en arcos o anillos, o descompuestas en imágenes múltiples— por lentes gravitacionales constituidas por materia oscura. Pierre Sikivie, de la Universidad de Florida, y otros quieren convertir un gigantesco imán del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en un detector de axiones. Distintos laboratorios de los Estados Unidos y de Europa diseñan instrumentos para detectar partículas supersimétricas ligeras.

Volver al principio

A corto plazo, afirma Turner, la prueba más crucial de todos los modelos vendrá del fondo cósmico de microondas. Si el COBE o el observatorio del Polo Sur no encuentran fluctuaciones pronto, dice, "temblarán los cimientos de la cosmología".

¿Qué sucedería entonces? ¿Podría hundirse la misma gran explosión? Aunque nadie del simposio Nobel parece dispuesto a acosar esa hipótesis, otros científicos no se andan con contemplaciones. Hannes Alfven ha llamado la atención con un modelo que olvida la gran explosión y mantiene que es el electromagnetismo, y no la gravedad, el organizador dominante de la materia en el universo. Halton C. Arp, del Max Planck, ha argumentado que los desplazamientos hacia el rojo de las galaxias quizás no se deban a la expansión del universo.

Schramm, el mayor defensor de la gran explosión, insiste en que la teoría sobrevivirá a estos ataques, aun cuando no se encuentren fluctuaciones en el fondo de microondas cósmico. Dicho extremo condenaría las principales explicaciones de la formación de galaxias, incluyendo la materia oscura fría, y favorecería modelos más exóticos y extraños. Schramm señala que uno de tales modelos sostiene que la macroestructura del universo se gestó durante una transición de fase que tuvo lugar muy tarde, después de la descarga del fondo de microondas.

Ese enfoque le preocupa a Turok, el abogado de las texturas. Teme que a medida que las observaciones avancen en el conocimiento pormenorizado del universo, los cosmólogos vayan recurriendo a modelos cada vez más complicados e intrincados, al estilo del que imaginó Ptolomeo para explicar cómo giraban el Sol y los planetas en torno a la Tierra.

Peebles ve en la actual ola de observaciones un motivo de alegría, no de desesperanza. Las observaciones pueden eliminar muchas teorías, pero finalmente, dada la abundancia de talento y creatividad en la cosmología, surgirán otras nuevas que puedan explicar las cosas mucho mejor.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL UNIVERSO INFLACIONARIO. Alan H. Guth y Paul J. Steinhardt en *Investigación y Ciencia*, n.º 94, págs. 66-79; julio de 1984.

LOS ACELERADORES, BANCO DE PRUEBAS DE LA TEORÍA COSMOLÓGICA. David N. Schramm y Gary Steigman en *Investigación y Ciencia*, n.º 143, págs. 34-41; agosto de 1988.

EL EXPLORADOR DE LA RADIACIÓN CÓSMICA DE FONDO. Samuel Gulkis, Philip M. Lubin, Stephan S. Meyer y Robert F. Silverberg en *Investigación y Ciencia*, n.º 162, sección *Ciencia y sociedad*, págs. 38-42; marzo de 1990.

THE FIFTH ESSENCE: THE SEARCH FOR DARK MATTER IN THE UNIVERSE. Lawrence M. Krauss. Basic Books, 1990.

ORIGINS: THE LIVES AND WORLDS OF MODERN COSMOLOGISTS. Alan Lightman y Roberta Brawer. Harvard University Press, 1990.

Taller y laboratorio

Prendida en el viento una cámara capta el paisaje

Forrest M. Mims III

Solía envidiar a los halcones y águilas ratoneras que moran en la campiña que rodea mi casa y mi laboratorio. ¡Qué magníficas vistas tenían ante sí! Ahora, gracias a una cámara fotográfica que elevo por los aires valiéndome de globos o un pequeño dirigible, puedo vislumbrar las vistas de que gozan esas aves. Los arqueólogos emplean desde hace tiempo esta técnica para tomar fotos aéreas de sus excavaciones. Hace poco conversé con un profesor de agronomía que proyecta fotografiar cosechas experimentales con una cámara instalada a bordo de un globo. Estos sistemas, además, facilitan el trabajo a topógrafos, agricultores y meteorólogos.

Los dispositivos fotográficos suspendidos de globos, amén de baratos, caben en espacios reducidos. Flotan calmosamente sobre lugares inaccesibles a las aeronaves convencionales; pueden, asimismo, volar sobre monumentos históricos, barrios y otras zonas prohibidas a las aeronaves por razones de seguridad y ruido. He preparado globos con cámaras para fotografiar mi casa, los campos donde pacen nuestras ovejas y el riachuelo que bordea nuestra propiedad. Las imágenes resultaron mejores que las que obtuve desde un avión, ya que no había ventanillas, alas ni montantes que obstaculizaran la vista.

Las cámaras ideales para fotografía aérea son las de 35 mm del tipo apuntar-y-disparar, con enfoque y avance de película automáticos. Hay algunas que pueden disparar el obturador a intervalos prefijados. Dado que no requieren sistemas de control remoto, podemos limitarnos a embarcarlas en el globo y soltar éste. La cámara tomará automáticamente una serie de fotos aéreas.

Pero este procedimiento rinde resultados un tanto aleatorios, por lo que me inclino hacia las cámaras controladas por radio, que son más flexibles y fiables. La mayoría de las cámaras pueden dispararse mediante algún servomecanismo guiado por radio, como los que sirven para los automóviles controlados por radio; pero estos mecanismos pesan y consumen mucho. Una idea mejor es emplear una cámara de apuntar-y-disparar que pueda accionarse directamente por radioseñal. Aunque los detalles que siguen se refieran a mi cámara, una Ricoh FF-7, son también válidos para numerosas cámaras de accionamiento electrónico de otras marcas.

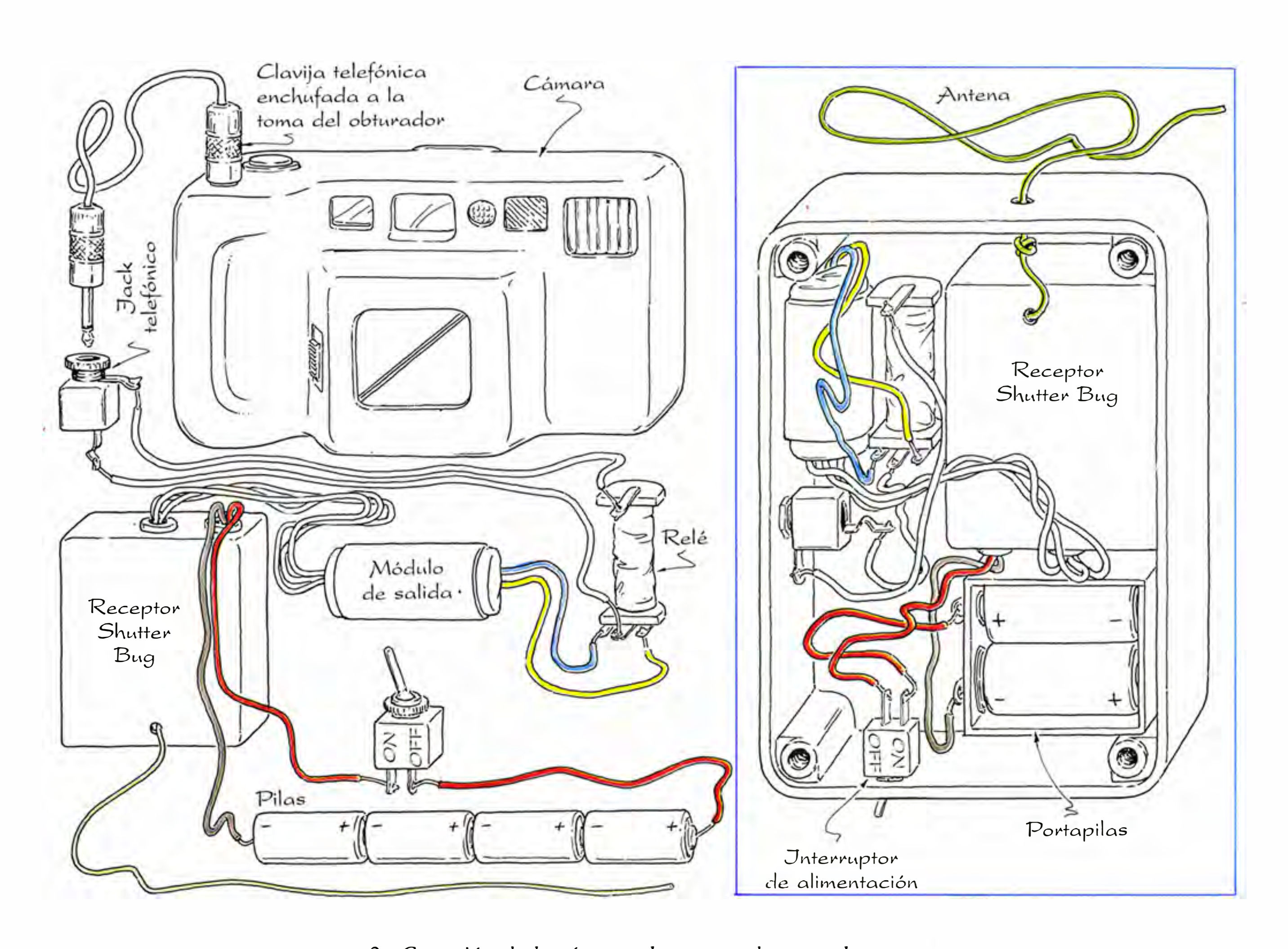
Hay muchos tipos de sistemas de radiocontrol capaces de disparar a distancia una cámara. Podemos aprovechar los controles de algún automóvil de juguete, aunque éstos son de alcance limitado y proclives a los disparos falsos por culpa de las radios de banda ciudadana y otras fuentes de radioondas. Los sistemas diseñados para el modelismo de barcos y automóviles, más caros, poseen bastante mayor alcance y son menos sensibles a las falsas señales.

Pondremos siempre cuidado en no emplear un sistema de radiocontrol diseñado para aeromodelos. En Estados Unidos, la Comisión Federal de Comunicaciones tiene asignadas unas frecuencias específicas al aeromodelismo porque una interferencia de radio puede provocar que un aeromodelo se estrelle. Nadie desea variar accidentalmente el vuelo del aeromodelo del vecino para dirigirlo contra una ventana o una pared.

Durante dos años, he estado accionando cámaras a distancia con un sistema de radiocontrol de un solo canal construido por Ace Radio Control, Inc. (Box 511, Higginsville, MO 64037). No hace mucho que esta firma introdujo su sistema Shutter Bug, cuya inmunidad a las interferencias es mayor que la de los sistemas anteriores. Consta de un transmisor, un receptor y un módulo de salida.

En la figura 2 se muestra la manera de conectar el receptor del Shutter Bug a mi cámara. Del receptor, en-

1. Fotografía aérea oblicua de la campiña circundante a la casa de campo del autor.



2. Conexión de la cámara al receptor de control remoto.

cerrado en una caja de plástico, salen varios cables. De éstos, la antena es el que va solo. Los cables rojo y negro trenzados con el pequeño interruptor de palanca son las conexiones a la fuente de alimentación. Otros tres cables trenzados conectan el receptor al módulo de salida.

Los cables que surgen del módulo de salida deben soldarse a las patillas de un relé miniatura de cinco volt provisto de una resistencia de carrete de 250 ohm o más. (Este relé es un interruptor electromecánico capaz de accionar una cámara de control electrónico.) Seguidamente se sueldan los extremos de un par de cables a los terminales móviles y normalmente abiertos del relé. Los otros extremos se sueldan a un jack de auricular de 3 mm. Para conectar este jack de salida a la toma del control remoto de la cámara, se prepara un trozo de cable soldando a los extremos de éste sendas clavijas telefónicas de 3 mm.

El receptor necesita una fuente de alimentación de seis volt, que puede formarse con cuatro pilas de 1,5 volt conectadas en serie. Usaremos un portapilas AAA para cuatro pilas. El cable rojo del receptor se suelda al terminal positivo de la batería; el cable negro al negativo. Antes de volver a colocar las pilas, se comprobarán dos veces las conexiones.

A continuación, se abren los interruptores de alimentación del transmisor y el receptor. Se comprobará que la cámara esté conectada. Al oprimir el botón de activación al transmisor, se cerrarán los contactos del relé, se soltará el obturador y avanzará la película. Si la cámara no respondiese, se mantendrá oprimido el botón del transmisor durante dos segundos. Si no ocurriera nada, se comprobarán el cableado y las pilas, que deben dar de cinco a seis volt.

El sistema receptor y el paquete de pilas se instalan en una caja de plástico [*véase la figura 2*]. El receptor se asegura con cinta adhesiva por las dos caras, o con cinta de fijación de gancho-y-ojal; el espacio entre los componentes se rellena de plástico alveolar. Una vez montado todo el sistema, se sacude y se comprueba si aún sigue funcionando.

El conjunto del sistema receptor puede sujetarse al dorso de la cámara con bandas de goma. O, mejor aún, la cámara y el receptor pueden montarse en una placa hecha de chapa de aluminio o contrachapado de aeromodelismo [*figura 3*]. En la placa, se practican orificios que sirven para aliviar peso y proporcionan puntos de sujeción para la cámara, el receptor y el cordaje de suspensión.

El receptor puede asegurarse con un perno y la cámara puede montarse directamente en la placa con un tornillo (comprado en una tienda de artículos de fotografía) que case con el receptáculo del trípode. La cámara puede reorientarse montando la placa de varias formas, o bien uniendo aquélla a un soporte de rótula (que podrá conseguirse en casi todas las tiendas de artículos fotográficos). Como medida de seguridad, la cámara se atará a la placa con un trozo de cordel.

Para estar seguro de que la placa cuelga verticalmente, ato el receptor a una banda de aluminio que sobresale de aquélla y que contrapesa a la cámara. El cabo de amarre que retiene a todo el artefacto, impidiendo que el aire lo arrastre a la deriva, se ata directamente a la placa, y no a los globos; evito así que la cámara rote o se balancee.

Tendremos ahora que hacernos con los globos, helio y un torno en el que arrollar el cabo de amarre. Podremos aquí emplear globos meteorológicos de excedente, pero son frágiles. Cuando, pese a todo, opto por un globo meteorológico, añado un paracaídas cuyo velamen va sujeto al globo, o bien dispongo dos o más de éstos. Gracias a esta precaución, mi cámara se salvó en dos ocasiones en que un globo reventó estando a gran altura.

Una solución más segura y mucho más barata que los globos meteorológicos, o que los caros globos de caucho, es la que yo llamo dispositivo SBPN, más conocida por Saco para Basura de Plástico Negro. Sacos para basura los hay de colores diversos, por lo que tendremos que cambiar la denominación según el caso (así, para un saco amarillo, diremos SBPA, y para uno rojo, SBPR). Pero los mejores son los negros, que absorben el calor solar, dilatando su volumen y reforzando con ello su fuerza ascensional. Procurémonos sacos de la máxima capacidad posible. El helio puede comprarse en tiendas de útiles para soldadura o de artículos para fiestas.

Los cilindros para gas pesan mucho y, cuando se transporten, se comprobará que estén bien sujetos para que no caigan. Aunque el helio sea un gas inodoro, no tóxico e inerte, se vuelve asfixiante cuando desplaza al oxígeno necesario para respirar. Por tanto, los globos deben llenarse al aire libre o en una habitación bien ventilada.

A nivel del mar, el helio puede elevar aproximadamente 1,1 kilogramos por metro cúbico. El modo más simple para determinar la fuerza de elevación de un SBPN sencillo en el lugar de residencia consiste en llenarlo de helio y atarle un recipiente que se va llenando de agua hasta que el peso rebase la fuerza de elevación. Se pesa entonces el recipiente. Se averigua así que un SBPN de 230 litros eleva unos 70 gramos.

Para elevar la cámara necesitaremos más de un globo, salvo que éste sea de gran tamaño o dispongamos de un pequeño dirigible. El peso total de mi cámara y el receptor instalado en una caja de plástico es de 460 gramos. La placa y el cabo de amarre añaden de 100 a 200 gramos. Así pues, con nueve SBPN de 230 litros puedo elevar todo el artefacto con un margen del 10 o 15 por ciento. No hay que caer en la tentación de lanzar al vuelo la cámara suspendida sólo del número de globos estrictamente necesario para mantenerla en el aire. Lo adecuado es añadir uno o dos SBPN más, al objeto de que siga flotando en caso de que alguno de los sacos sufra una fuga. Con ello, además, evitaremos que una brisa leve pueda derribar el artefacto.

Para el primer vuelo, se reúnen todos los elementos necesarios en un lugar conveniente. Se carga la película en la cámara y se prueba el sistema de radiocontrol. Luego se lanza un pequeño globo de helio atado a un cabo de amarre de 10 metros de longitud. Si ese globo cae a tierra, sabremos que el viento es excesivo para que vuele la cámara.

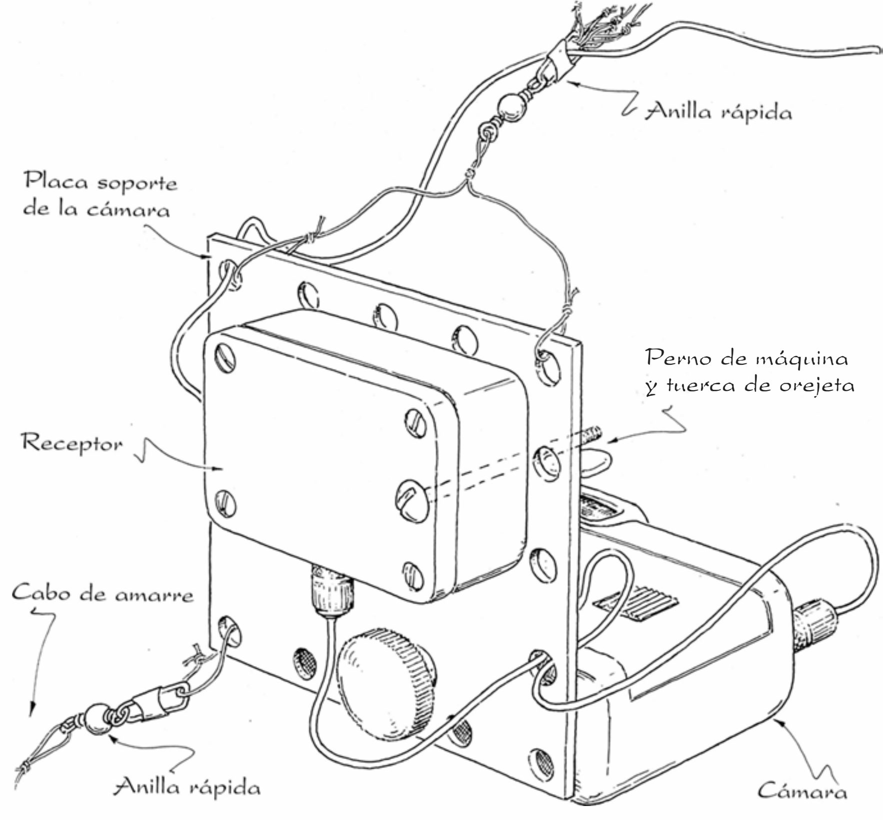
Antes de insuflar el helio en cada saco, éste se estruja a fondo para que expulse todo el aire. Después se aplica la boca del saco a la boquilla del depósito del gas y se mantiene así mientras fluya helio hacia el interior. Cuando el saco está lleno, su abertura se retuerce y se dobla sobre sí, asegurándola con cinta adhesiva. Sobre ésta se ata un trozo de cuerda de plástico. En el otro extremo de esa cuerda, se hace un lazo y se une a una anilla de enganche rápido, como las que se usan en los artes de pesca [*figura 3*]. La anilla se enlaza a un bloque de madera, que luego podrá emplearse a modo de ancla.

Una vez hinchados todos los SBPN, los lazos de los extremos de sus cuerdas respectivas se unen a otra anilla rápida que estará atada al soporte de la cámara. Compruébese que el cabo de amarre del soporte se encuentra, por el momento, bien anclado en tierra.

Los sacos para basura y los globos esféricos tienen malas cualidades aerodinámicas. Basta una leve brisa para derribar un globo amarrado si la fuerza ascensional de éste es sólo un poco mayor que su carga. Desequilibrio que puede compensarse efectuando el lanzamiento cara al viento desde el punto que se desee fotografiar. Para ello, el torno del cabo de amarre se ancla en un lugar situado viento abajo del punto a fotografiar. Luego, con el globo sujeto con las manos, se camina cara al viento, a la vez que el cabo se va desenrollando del carrete. Se suelta entonces el globo y se regresa corriendo al carrete. (Cuidado con el suelo durante esta maniobra.)

Se vigila atentamente la cámara mientras regresa a nuestro objetivo. Cuando se encuentre aceptablemente quieta, se oprime el botón de disparo del transmisor. Si la cámara se balanceara, el botón se oprimirá cuando aquélla se encuentre en la cúspide de cada balanceo.

Es posible que, cuando se agote el cabo de amarre, el globo caiga al suelo, por lo que hay que asegurarse de



3. Soporte de la cámara con su cordaje.

que no existen carreteras, tendidos eléctricos u otros factores de riesgo bajo la trayectoria de vuelo. No debe tirarse del cabo cuando el globo se halle sobre árboles u otros obstáculos, pues acaso lo derribemos precisamente sobre el obstáculo que estemos tratando de evitar. Además, el artefacto se hará volar sólo con aire encalmado y nunca cuando se avecine una tormenta eléctrica. Para hinchar los globos, se empleará sólo helio; el hidrógeno y otros gases más ligeros que el aire, inflamables, pueden estallar. Como cabo de amarre no se empleará nunca cuerda metálica. Tampoco se disparará nunca la cámara con un par de cables metálicos conectados con el suelo, pues si tocaran alguna línea eléctrica, cualquiera que entrara en contacto con ellos podría recibir una descarga mortal. Evitemos las proximidades de los aeropuertos, los edificios altos, las líneas eléctricas y las carreteras muy concurridas.

Si buscamos algo mejor que los sacos para basura, nos darán buenos resultados los dirigibles flexibles que se emplean en publicidad o para el lanzamiento de instrumental meteorológico. Dado que son aerodinámicamente estables, pueden hacerse volar con brisa y su gran capacidad les permite elevar varios kilogramos hasta 200 metros o más. Para lanzar al vuelo mi cámara y otros instrumentos, empleo un dirigible que mide 4,2 metros de longitud por 0,9 metros de diámetro. Es capaz de elevar dos cámaras y un sistema radiorreceptor.

Merced a la fotografía aérea pueden averiguarse muchas cosas. Por ejemplo, con una foto vertical podemos medir las dimensiones de un objeto. Dividiendo la altura de la cámara (h) por su distancia focal (f), se obtiene un factor de escala conocido como escala fotográfica inversa (EFI). Si la dimensión de la imagen de un objeto es d y es D la dimensión verdadera, será EFI $= D/d$. Si conocemos d y la EFI, tendremos que $D = d \times$ EFI.

Supongamos que una cámara de 35 mm de distancia focal nos da una foto de una valla desde una altitud de 100 metros. Resultará así una EFI de 100/0,035 = 2857. Si la longitud de la valla medida en el negativo de la foto (d) es de 20 milímetros, la longitud de la valla (D) será $0{,}02 \times 2857 = 57{,}1$ metros.

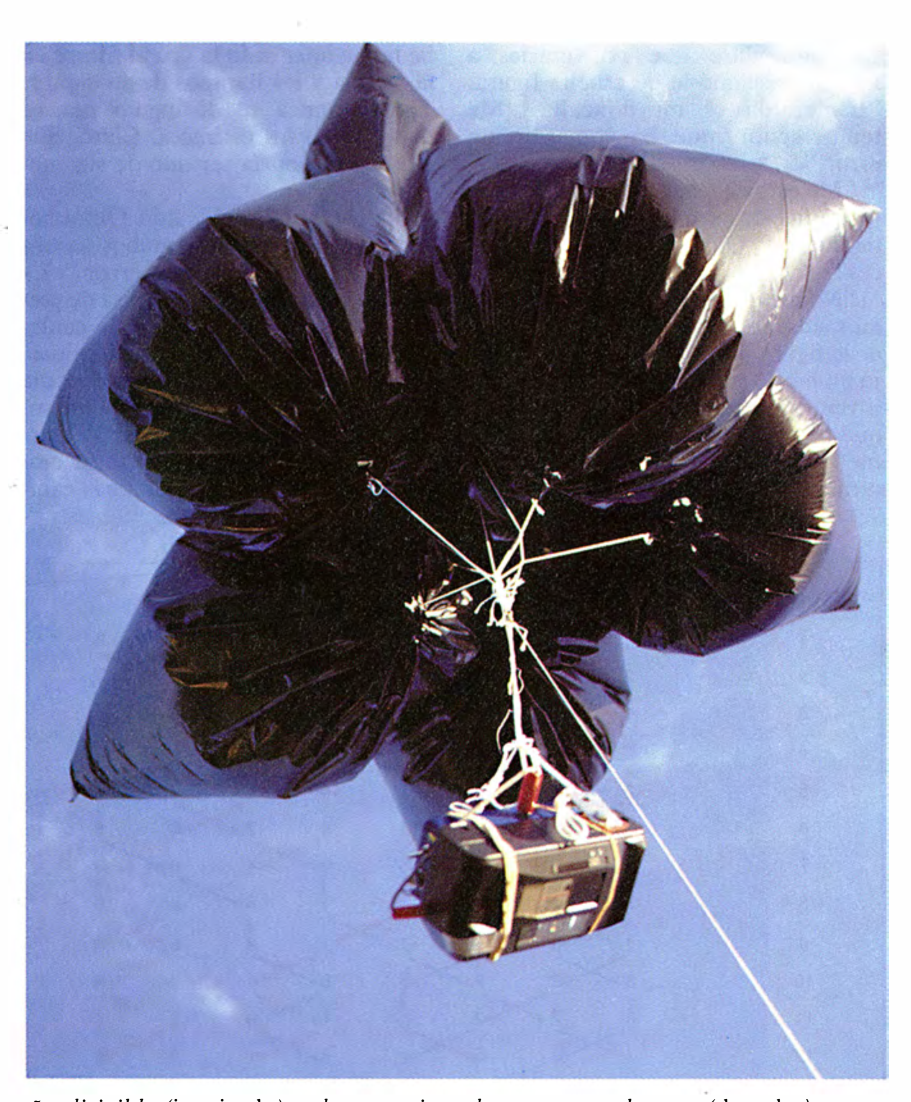
Pudiera ser que deseáramos saber la altitud del globo. La podemos calcular si conocemos cuánto mide realmente un objeto que aparezca en la foto. La fórmula es $h = (f \times D)/d$. Supongamos, por ejemplo, que un tramo de camino o calle cuya longitud real es de 20 metros presente una longitud de 10 milímetros en un negativo dado por una cámara de 35 mm de distancia focal. La altitud será $(0{,}035 \times 20)/0{,}01 = 70$ metros.

Con estas fórmulas, podremos determinar a qué altura hay que elevar una cámara para fotografiar una zona dada. Una diapositiva o un negativo de 35 milímetros mide aproximadamente 23 milímetros de ancho por 35 milímetros de largo. Una cámara de 35 mm con un objetivo de la misma distancia focal será, por tanto, capaz de cubrir un espacio de 197 por 300 metros cuando vuele a una altitud de 300 metros.

Quienes se decidan a practicar la fotografía aérea con globos no tardarán en acumular toda una serie de peripecias ilustradas por una colección de carpetas de fotos aéreas. Que los vientos les sean propicios y los aterrizajes suaves.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AIRBORNE CAMERA: THE WORLD FROM AIR AND OUTER SPACE. Beaumont Newhall. Hastings House, 1969.



4. Cámara suspendida de un pequeño dirigible (izquierda) *y de un racimo de sacos para basura* (derecha).

Juegos matemáticos

Quasimódulo, campanero de la catedral y experto singular en teoría de grupos

Ian Stewart

Entre otras deformidades, Quasimódulo tenía la joroba de las matemáticas. Posado como un buitre en una viga de roble, a medio camino entre la campana mayor de la catedral y su vecina, sostenía tiernamente en sus brazos membrudos una figurilla esbelta. La figura abrió un ojo, pestañeó un par de veces, quedó boquiabierta de asombro y se debatió furiosa, tratando de desasirse.

"¿Esmeralda...?", preguntó Quasimódulo, lleno de esperanza.

"¡Pues claro que no, gracias a Dios!", exclamó la de esbelta figura. "Esmeralda es mi doncella. ¡Me temo, señor, que ha cometido un error!"

"Me estoy haciendo demasiado viejo para estos trotes", pensó Quasimódulo. "¿Quién es usted, entonces?"

"No me es posible decírselo, no hemos sido presentados", dijo la titular de la figura juncal. Quasimódulo aflojó un punto la fuerza de su abrazo. La joven desvió la mirada hacia el vacío que se abría bajo ella y se asió con fuerza al pecho del jorobado. "Por otra parte, nunca he sido amiga de formalidades. Soy Jane Porter, hija del profesor Arquímedes Q. Porter... la de *Tarzán de los monos*, ¿sabe? Esto... ¿por un azar no se dedicará usted a columpiarse de los árboles en lugar de mariposear por campanarios...?" La muchacha le miró con ojos esperanzados. "¿No será usted un mocetón bronceado y musculoso que atiende por Tarzán, verdad? ¿Le suena de algo el nombre de Greystoke? Como se desenvuelve tan bien entre cuerdas, quizás entre lianas..." Se le fue apagando la voz al fijarse en la joroba y los harapos de su captor. Tarzán nunca se distinguió por su maestría en los disfraces. Claro, que la criatura podría ser uno de sus monos...

"¡Vaya por Dios!", dijo Quasimódulo. "Me parece que ambos hemos cometido un desdichado error." La transportó a una ancha cornisa de piedra, donde no había riesgo de caída. "Le suplico que acepte mis disculpas, Jane. Esta vista mía empeora de día en día." Clavó ella los ojos en los suyos y el hombre fue incapaz de sostener la mirada. Para aliviar su embarazo empezó a saltar de unas campanas a otras, haciéndolas sonar más y más fuertemente, ¡bong-bong-dong-ding-*bong-dong*-BONGGG!!!

"Salta a la vista que no es usted campanólogo", dijo Jane con altivez.

"No, señorita, soy católico."

"Quiero decir que de tocar las campanas, ni flores."

Quasimódulo la miró. Miró después a las campanas y luego otra vez a Jane. "¿Pues qué le parecen estas cosas, jovencita? ¿Teteras?"

"Le concedo que está haciendo sonar las campanas, pero eso no le convierte en campanero. No, desde luego, en el sentido que yo le doy a ese nombre. En *Inglaterra* —dejó una pausa para remachar la palabra— nos tomamos los toques de campana con toda seriedad. He prestado oído con toda atención y me he fijado en que ha hecho sonar la campana de bordón, la más grave, tres veces por lo menos y en cambio ¡no ha tañido para nada la campana aguda!"

"¿Y eso está mal?"

"¡Señor, ha infringido usted la regla más básica a que ha de atenerse todo carillón!" Y Jane tuvo que explicar con cierta extensión a qué se refería.

Es grande en Inglaterra la afición a tocar las campanas. Grupos de tañidores y campaneros se reúnen regularmente en las iglesias para tocar lo que llaman "cambios", que son toques con variaciones. Significa esto que han de tañer un conjunto dado de campanas en distintos órdenes, hasta que que todos los órdenes posibles se hayan tocado exactamente una vez.

"Un sencillo problema de combinatoria", murmuró Quasimódulo.

"¡Por el amor del Cielo! ¡Este ser ha recibido instrucción!", exclamó Jane, sorprendida.

"Es una historia sin importancia", dijo Quasimódulo. "Yo era profesor de matemáticas en la Universidad de París. Mi especialidad eran las vibraciones de los cuerpos sólidos; las campanas, mi pasión. ¡Qué belleza no encierra el espectro armónico de una campana! ¡Qué decir de las funciones de Bessel, de los autovalores de la laplaciana! Pero mi creciente deformidad, que yo atribuyo a ir cargado sin cesar con gruesos tratados sobre la ecuación de ondas llegó al punto de que mi joroba me impedía escribir en la pizarra y me vi obligado a aceptar una jubilación anticipada. Vagaba por las calles, convertido en una ruina miserable y famélica, oyendo sin cesar la llamada de las campanas de Notre Dame, que cantaban mi nombre... Una noche, durante la luna llena, trepé por el exterior de la torre, y ahora

TOQUE	DESPLAZAMIENTOS DE LAS CAMPANAS							
1	1	2	3	4	5	6	7	8
2	2	1	3	5	4	6	8	7
3	1	2	5	3	6	4	7	8
4	2	1	3	5	6	4	8	7
5	2	3	1	5	4	6	7	8
6	3	2	5	1	4	7	6	8
7	2	3	1	5	7	4	8	6
8	3	2	5	1	7	8	4	6
9	2	3	5	7	1	8	6	4
10	3	2	7	5	8	1	4	6
11	3	7	2	5	1	8	6	4
12	7	3	5	2	8	1	4	6

1. *Los doce primeros toques del carillón llamado* Glasgow Surprise Major.

tengo tanta práctica en esa maniobra que nadie ha podido atraparme jamás."

"Una historia triste", suspiró Jane.

"No del todo. Esta vida tiene también aspectos positivos. Para empezar, me he librado de la corrección de exámenes. Pero todo este parloteo ocioso me encrespa el lomo. Estábamos hablando de campanas."

"Yo sí, desde luego", dijo Jane. "Estoy versada en el arte matemático, gracias a mis tutores ingleses."

"¿No le molestará entonces que declare que el problema es trivial? Pues si hay n campanas, el número de distintas ordenaciones es el *factorial* de n, denotado

$$n! = n\,(n-1)(n-2)\ldots\,3.2.1$$

las cuales, a su vez, pueden ser tocadas en un orden cualquiera. Hay por consiguiente $(n!)!$ formas de tocar variantes en n campanas, número que crece con enorme velocidad..."

"¡Ah, pero es que no me ha dejado enunciar todas las reglas!", dijo Jane. "Denotemos las campanas con los números 1, 2, 3,..., n, ordenadas de más aguda a más grave. La campana 1 es llamada tiple o sobreaguda; la campana n es la campana mayor o bordón. Cada secuencia u ordenación de toque de las campanas, esto es, cada disposición de los símbolos 1, 2, ..., n se llama un cambio o variación. El toque ordenado por tono decreciente 1, 2,..., n es el toque básico, que en Inglaterra se dice que está *en rondas*. Finalmente, una secuencia completa en la que figuren todas las variaciones posibles (más una, repetición de la primera) se llama un *aire* o *carillón*. Para tocar un carillón completo hay que atenerse a cinco reglas." [*Véase el recuadro 1.*]

RECUADRO 1

Reglas para tañer un aire completo

1. El aire o carillón ha de comenzar y concluir en rondas.
2. Ha de pasar sin repetición por todas las variaciones posibles entre las rondas inicial y final.
3. Ninguna campana puede moverse más de un lugar entre variaciones sucesivas.
4. Ninguna campana puede permanecer en un mismo lugar durante más de dos variaciones sucesivas.
5. Cada campana ha de moverse de forma igualmente variada.



2. *Quasimodo; ilustración de* Nuestra Señora de París, de Victor Hugo.

"La regla 1 es por musicalidad", señaló Jane.

"Una escala descendente, sí", dijo Quasimódulo. "Ya veo. Así pues, la secuencia 1,2,3... n aparece por dos veces: una al principio y otra al final. Pero todas las demás ordenaciones..."

"¡*Variaciones*, Quasimódulo! ¡Utilice una terminología apropiada, haga el favor!"

"...variaciones aparecen exactamente una vez."

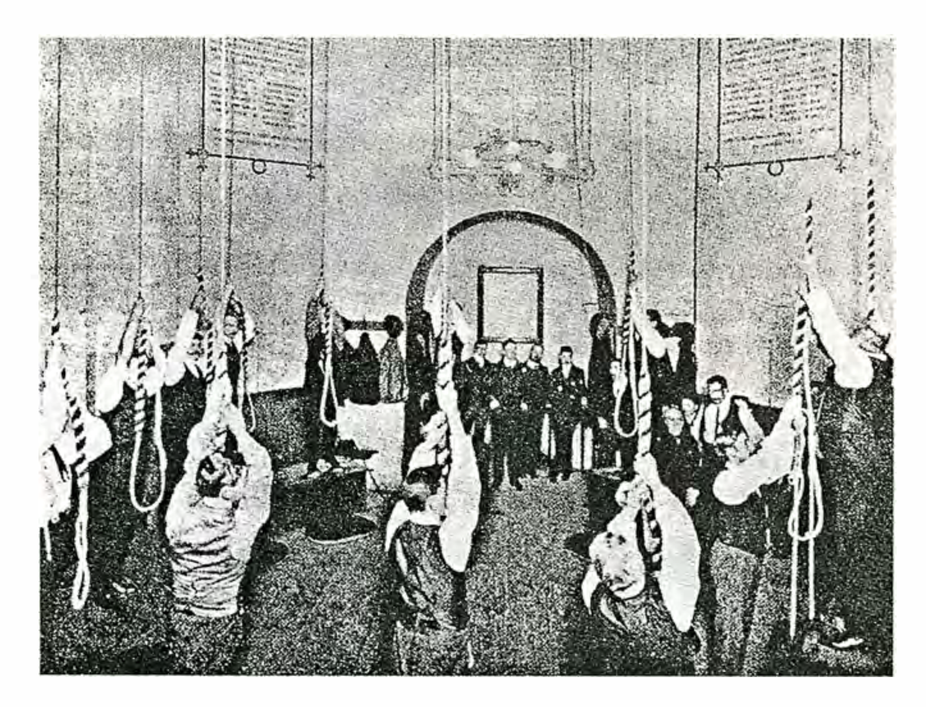
"¡Exactamente! La regla 2 es matemáticamente satisfactoria, pero tiene además una finalidad práctica, la de producir máxima variedad."

"Y supongo que la regla 3 obedece a razones mecánicas", dijo Quasimódulo. "Una campana adquiere un impulso considerable y no es nada fácil abreviar o alargar el periodo entre toques sucesivos." Se interrumpió. "¡Pues no lo sabré yo!"

"¡Correcto! La regla 4 busca la variedad, y la regla 5 —que he de admitir que es un tanto imprecisa— la simetría. Tengo que añadir que no es raro relajar las reglas 4 y 5, por razones artísticas."

"Los distintos números de campanas utilizadas en la práctica reciben nombres especiales: 3 es *singles*, 4 *minimus*, 5 *doubles*, 6 *minor*, 7 *triples*, 8 *major*, 9 *caters*, 10 *royal*, 11 *cinques* y 12 *maximus*. Por ejemplo, el método llamado *Glasgow Surprise Major* ha de aludir, en virtud de la última palabra de su nombre, a variaciones tocadas en 8 campanas. Comienza como vemos en la figura 1.

Las líneas de color muestran los movimientos de cada campana; obsérvese que ninguna se desplaza nunca más de un puesto a la derecha o la izquierda de la secuencia. Por otra parte, ninguna campana conserva su lugar durante más de dos cambios. Por ejemplo, la campana 6 permanece en la posición 6 durante las dos



3. Los campaneros de la catedral de San Pablo, en Londres, se aprestan a tocar un carillón de doce campanas (*un* maximus)

primeras variaciones pero cambia a la tercera. El aire completo supone 8!+1 = 40321 cambios, lo que hace inviable enumerarlo aquí, aunque espero haber dado la idea general."

"¡Desde luego que sí!", dijo Quasimódulo. "Y ya he demostrado un primer teorema: ¡Con tres campanas sólo son posibles dos carillones!"

"Si es un teorema, forzoso es que tenga una demostración."

"En efecto. Es fácil ver que cada cambio ha de intercambiar sólo dos campanas; no es posible mover las tres y al mismo tiempo mover cada una sólo un lugar. Además, no es posible dejar en su lugar la campana central, pues ello exigiría intercambiar las de los extremos, lo que exige desplazar cada una dos lugares, con infracción de la regla 3. Así pues, los dos cambios han de consistir en la transposición de las dos primeras campanas o de las dos últimas. No es posible ejecutar dos veces sucesivas la misma transposición, porque al hacerlo se repetiría un cambio. Por tanto, los dos cambios han de ejecutarse alternativamente. Si comenzamos permutando entre sí 1 y 2 obtenemos

123 213 231 321 312 132 123

y si comenzamos por el intercambio 23 resulta

123 132 312 321 231 213 123

un "aire" que —ahora me doy cuenta— no es más que la retrogradación de la primera serie de cambios."

"¡Excelente! La primera secuencia que ha mencionado se llama *quick six* (seis rápido) y la segunda, *slow six* (seis lento)."

"Son nombres bien curiosos: si una es justamente la inversa de la otra, se debería tardar lo mismo en las dos."

"Tal vez sea cosa psicológica; la segunda *suena* más lenta."

Jane parecía pensativa. "¿Sabe? Su demostración me hace pensar que ha de existir una estructura subyacente a todo esto."

"Bueno... yo podría representar mi demostración mediante un *grafo*. Imagine que dibujo seis puntos, uno por cada posible ordenación de los símbolos 1, 2, 3. Esos serían entonces los cambios o variaciones. Después uniré los cambios mediante una línea roja si es posible pasar de uno al otro por intercambio de los dos primeros símbolos, y por una línea verde si puedo pasar de uno a otro por intercambio de las dos últimas campanas. El problema del campaneo de las seis variaciones se convierte así en un problema de teoría de grafos, a saber: el de hallar un circuito hamiltoniano, o sea, un bucle cerrado que pase por cada punto una vez y solamente una. Este caso es muy sencillo, porque el grafo entero forma ya un circuito [*figura 4*]. Las dos soluciones recorren el circuito, una en sentido horario y la otra en sentido antihorario."

"Mmm...Pero el problema de hallar circuitos hamiltonianos sigue sin solución en el caso general. Y por otra parte, tengo la corazonada de que tiene que haber una estructura más rica."

"Me imagino que va a ser un problema de teoría de grupos."

"¡Pues claro! Quasimódulo, es usted un genio. ¿Cómo ha podido saberlo?"

La teoría de grupos trata de conjuntos de transformaciones que, ejecutadas en sucesión, producen otra transformación perteneciente al mismo conjunto. (Aunque la definición habitual es más abstracta, ésta resultará suficiente aquí.) Dentro de un instante, los lectores sabrán a qué me refiero. La clave de las matemáticas del campaneo consiste en centrarse no en la secuencia particular de campanas tañidas en un cambio determinado, sino en la transformación que las redispone.

Definamos dos transformaciones, P y U como sigue:

P = "intercambio o transposición de las dos *primeras* campanas".

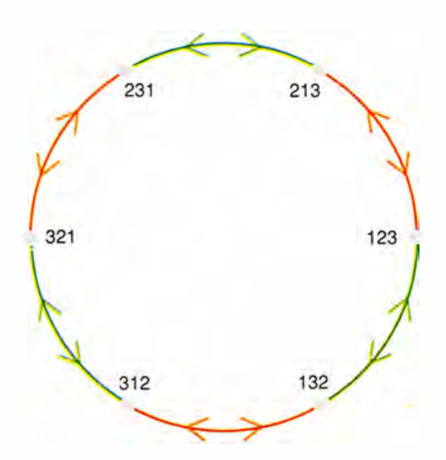
U = "intercambio de las dos *últimas* campanas".

Por ejemplo, si al campaneo 312 le aplicamos la transformación P obtenemos 132, mientras que si le aplicamos U resulta 321.

Las transformaciones P y U están ilustradas en la figura 5*a*. Análogamente, denotemos por I a la transformación *identidad*:

I = "dejar todas las campanas cual están".

Con estas notaciones, los dos aires o carillones "quick six" y "slow six"



4. Grafo de las disposiciones posibles de un vuelo al siguiente, con tres campanas. Las permutaciones que operan sobre las dos primeras campanas van en rojo; en verde, las que operan sobre las dos últimas.

adoptan una expresión muy regular, que vemos en el recuadro 2.

El recuadro 2 exige alguna explicación. Se han numerado los cambios sucesivos y se ha enumerado la secuencia de campanas a tañer. La transformación utilizada para obtener esa secuencia partiendo de la variación anterior está dada en la columna "movimiento" —el elemento *I* de la columna es puramente convencional, ya que no existe una variación previa; el efecto combinado de todos los operadores utilizados aparece anotado en la última columna bajo el encabezamiento "permutación". Entendemos por ella la transformación que produce la variación dada a partir de la secuencia inicial 123. En la tabla 1, cada permutación está expresada mediante una ristra de *P* y *U*. Estas ristras han de leerse de *derecha a izquierda*; por ejemplo, *UPU* significa "primero, efectuar *U*, después *P* y después, volver a efectuar *U*". Véase la figura 5*b*.

Para mayor concreción, fijémonos en la variación "slow six". Comentarios similares valen para "quick six", intercambiando *U* y *P*.

El séptimo cambio es el mismo que el primero. Esto es, la ristra *PUPUPU* produce el mismo efecto que la transformación *I*. Tal hecho se denota simbólicamente

$$PUPUPU = I$$

o también

$$(PU)^3 = I,$$

lo cual se ilustra en la figura 5*c*.

De hecho, *cualquier* ristra compuesta por *P* y *U* ha de conducir precisamente a una de las seis posibles variaciones, por lo que cualquiera de tales ristras es igual a una de las seis *I*, *U*, *PU*, *UPU*, *PUPU*, *UPUPU*. En particular, al combinar dos de estas ristras obtenemos una ristra que ha de ser igual a una de las seis recién enumeradas. Por ejemplo

$$(UPUPU)(PUPU)$$

es la misma (suprímanse los paréntesis) que

$$UPUPUPUPU.$$

La cual (introduciendo paréntesis de distinta forma) es

$$(UPUPUP)(UPU)$$

y como $UPUPUP = I$, obtenemos $(I)(UPU)$ que es igual a

$$UPU$$

RECUADRO 2

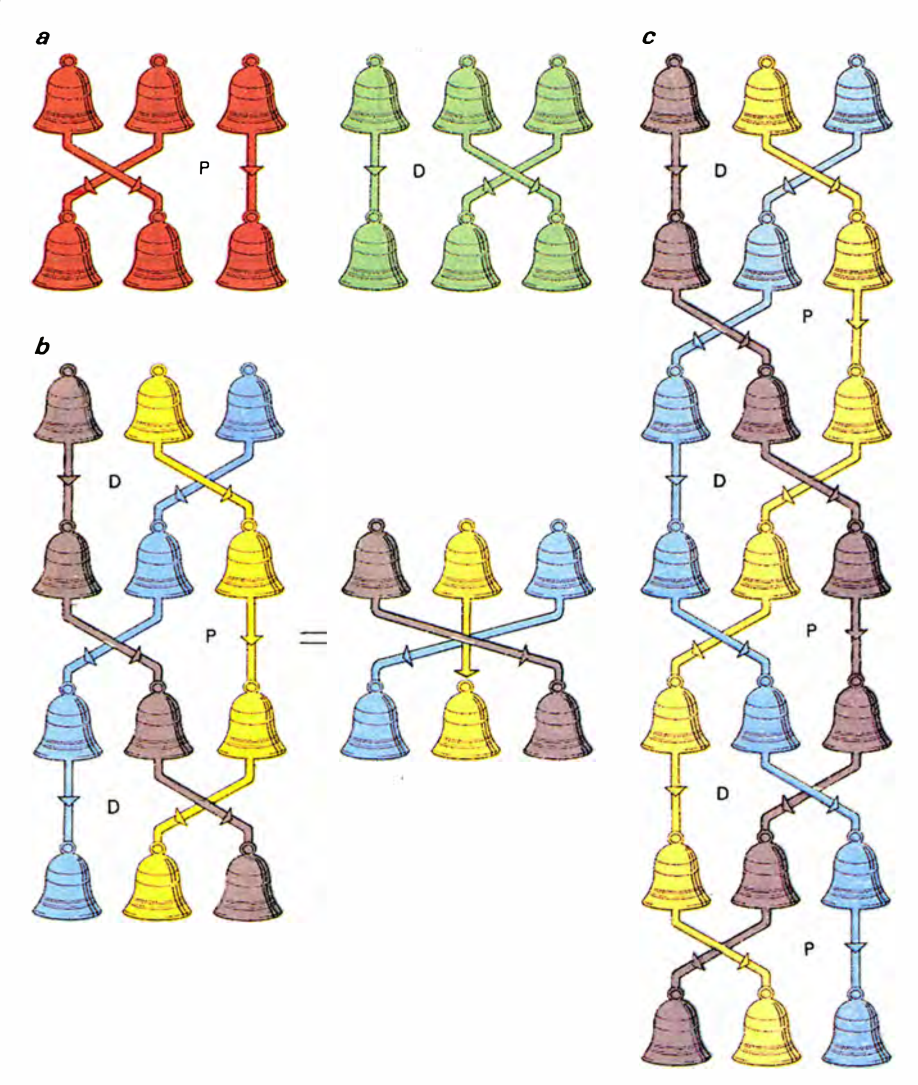
Los aires "*quick six*" y "*slow six*" expresados mediante transformaciones

Slow six

	Cambio	Movimiento	Permutación
1	123	I	I
2	213	P	P
3	231	U	UP
4	321	P	PUP
5	312	U	UPUP
6	132	P	PUPUP
7	123	U	UPUPUP

Quick six

	Cambio	Movimiento	Permutación
1	123	I	I
2	132	U	U
3	312	P	PU
4	321	U	UPU
5	231	P	PUPU
6	213	U	UPUPU
7	123	P	PUPUPU



5. (a) *Las permutaciones* P *y* U. (b) *La permutación* UPU. (c) *Demostración de* UPUPUP = I.

porque I no altera nada. Es decir,

$$(UPUPU)(PUPU) = UPU.$$

¿Qué sucede con $(UPUPU)(UPU)$? Podemos suprimir los paréntesis y escribirla como $UPUPUUPU$. Pero, ¿ahora qué?

Para lograr mayores progresos, fijémonos en que $UU = I$ porque U intercambia las dos últimas campanas, y su repetición deja todo como estaba. Podemos denotar este hecho como $U^2 = I$. Análogamente, $P^2 = PP = I$. Tenemos, pues,

$$UPUPUUPU = UPUPIPUP = UPUPPU = UPUIU = UPUU = UPI = UP.$$

Procediendo de igual forma, podemos construir una tabla de multiplicación completa para las seis ristras antes enumeradas. Véase el recuadro 3.

Al deducir el recuadro 3 se ha utilizado un truco muy útil que quizá no se haya detectado. La transformación P tiene que ser una de las seis enumeradas. Pero, ¿cuál es? Bueno,

$$P = PI = P(PUPUPU) = PPUPUPU = IUPUPU = UPUPU.$$

Vemos que el producto de *cada* par de ristras tomadas de entre las seis I, U, PU, UPU, $PUPU$, $UPUPU$ es otra de las seis. Es decir, el conjunto de las seis ristras constituye un *grupo*. Se denomina *grupo simétrico* S_3 y consta de la totalidad de las permutaciones de tres símbolos. Su estructura —la tabla de multiplicación— está completamente determinada por las cuatro identidades:

$IX = XI = X$ cualquiera que sea la ristra X
$U^2 = I$
$P^2 = I$
$(UP)^3 = I.$

Los lectores gustarán sin duda de calcular la tabla del grupo correspondiente al aire "quick six".

Seamos más generales. Recordemos que una *permutación* de n objetos ordenados es una transformación que los reordena. La forma habitual de denotar una permutación es un paréntesis que contiene dos hileras de símbolos:

$$\begin{pmatrix} \text{orden inicial} \\ \text{orden final} \end{pmatrix}$$

por ejemplo,

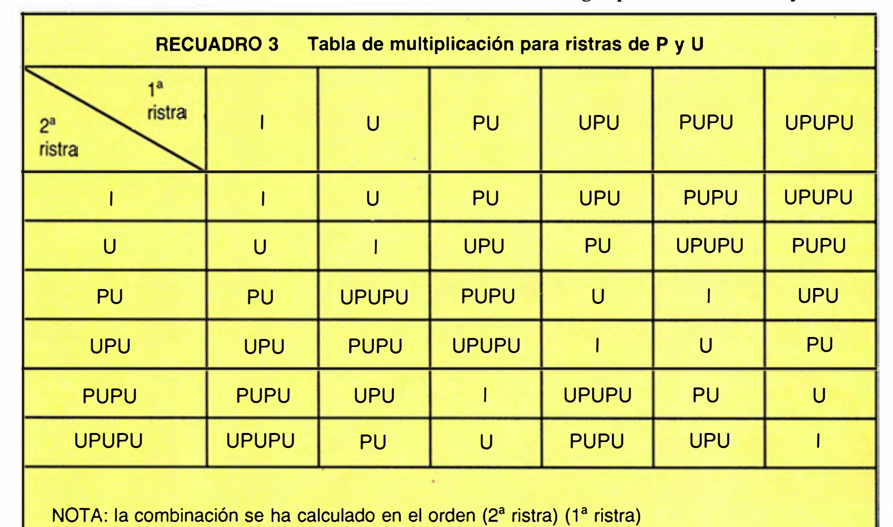
$$\begin{pmatrix} 1\,2\,3\,4\,5\,6\,7 \\ 2\,3\,1\,7\,5\,6\,4 \end{pmatrix}$$

significa:

"llevar el primer símbolo al segundo lugar,
llevar el segundo símbolo al tercer lugar,
llevar el tercer símbolo al primer lugar,
llevar el cuarto símbolo al séptimo lugar,
dejar el quinto símbolo en el quinto lugar,
dejar el sexto símbolo en el sexto lugar,
llevar el séptimo símbolo al cuarto lugar."

Vemos en la figura 6 el efecto de esta permutación. Es importante distinguir entre una disposición *particular* de los símbolos 1, 2, 3,..., n y una permutación: una permutación es una transformación aplicable a cualquier sucesión de n símbolos para producir una sucesión nueva. (Ello puede ser causa de cierta confusión, porque en lenguaje ordinario, cada ordenación se denomina permutación.) Por ejemplo, la permutación de la figura 6 produce la secuencia $CABGEFD$ al aplicarse a la secuencia de letras $ABCDEFG$; al aplicarse a la secuencia de números 7654321 produce 5761324, y así sucesivamente.

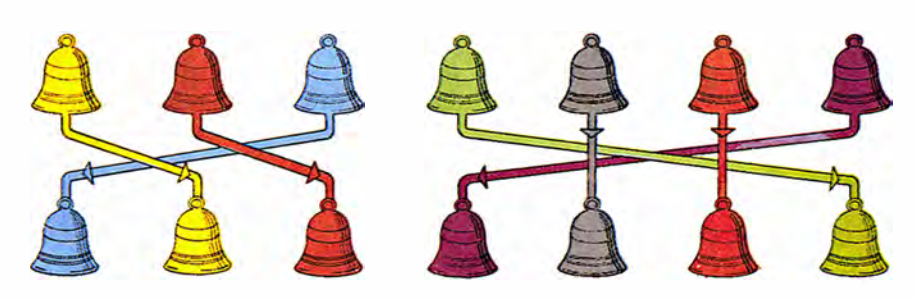
Las permutaciones se componen ejecutándolas por turno, como se muestra en la figura 7. Las $n!$ posibles permutaciones de n símbolos forman un grupo, conocido como grupo si-



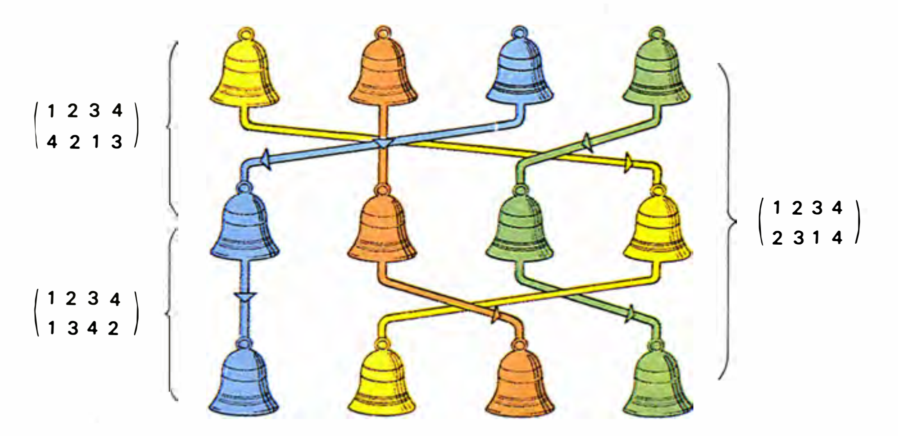
RECUADRO 3 Tabla de multiplicación para ristras de P y U

2ª ristra \ 1ª ristra	I	U	PU	UPU	PUPU	UPUPU
I	I	U	PU	UPU	PUPU	UPUPU
U	U	I	UPU	PU	UPUPU	PUPU
PU	PU	UPUPU	PUPU	U	I	UPU
UPU	UPU	PUPU	UPUPU	I	U	PU
PUPU	PUPU	UPU	I	UPUPU	PU	U
UPUPU	UPUPU	PU	U	PUPU	UPU	I

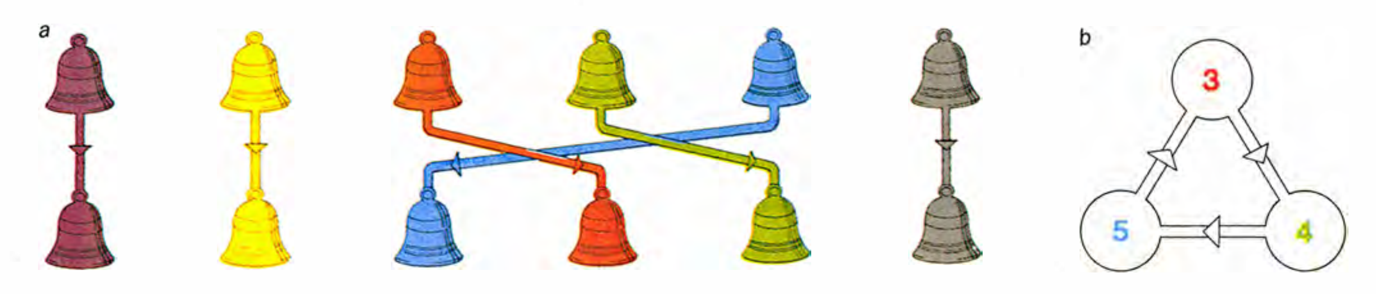
NOTA: la combinación se ha calculado en el orden (2ª ristra) (1ª ristra)



6. *Efecto de una permutación.*



7. *El producto de dos permutaciones da una tercera.*



8. (a) *El ciclo (345) es una permutación.* (b) *Así se "cierra sobre sí mismo".*

métrico de orden n, y que se denota S_n.

Existe para las permutaciones una notación más condensada, conocida por notación de ciclos. Por ejemplo, el ciclo

(3 4 5)

significa

"llevar el tercer símbolo a la cuarta posición,
llevar el cuarto símbolo a la quinta posición,
llevar el quinto símbolo a la tercera posición"

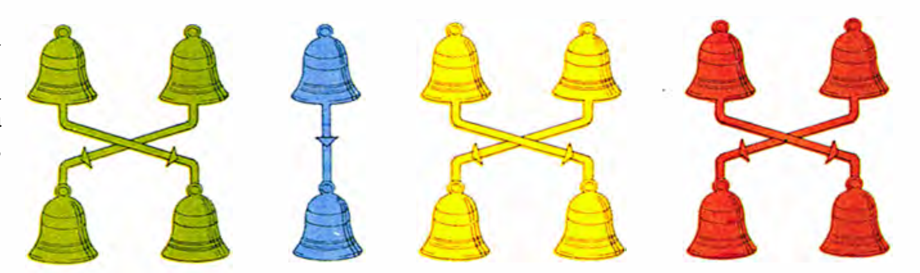
que vemos representada en la figura 8*a*. El último movimiento "cierra el ciclo" sobre el punto de partida, como se ve en la figura 8*b*. El ciclo (345), aplicado a ocho campanas en la secuencia 12345678, produce la nueva secuencia 12534678. Aplicado a la secuencia 35718243 da 35871243, y así sucesivamente.

Con mayor generalidad, un producto de ciclos como (345)(26) significa

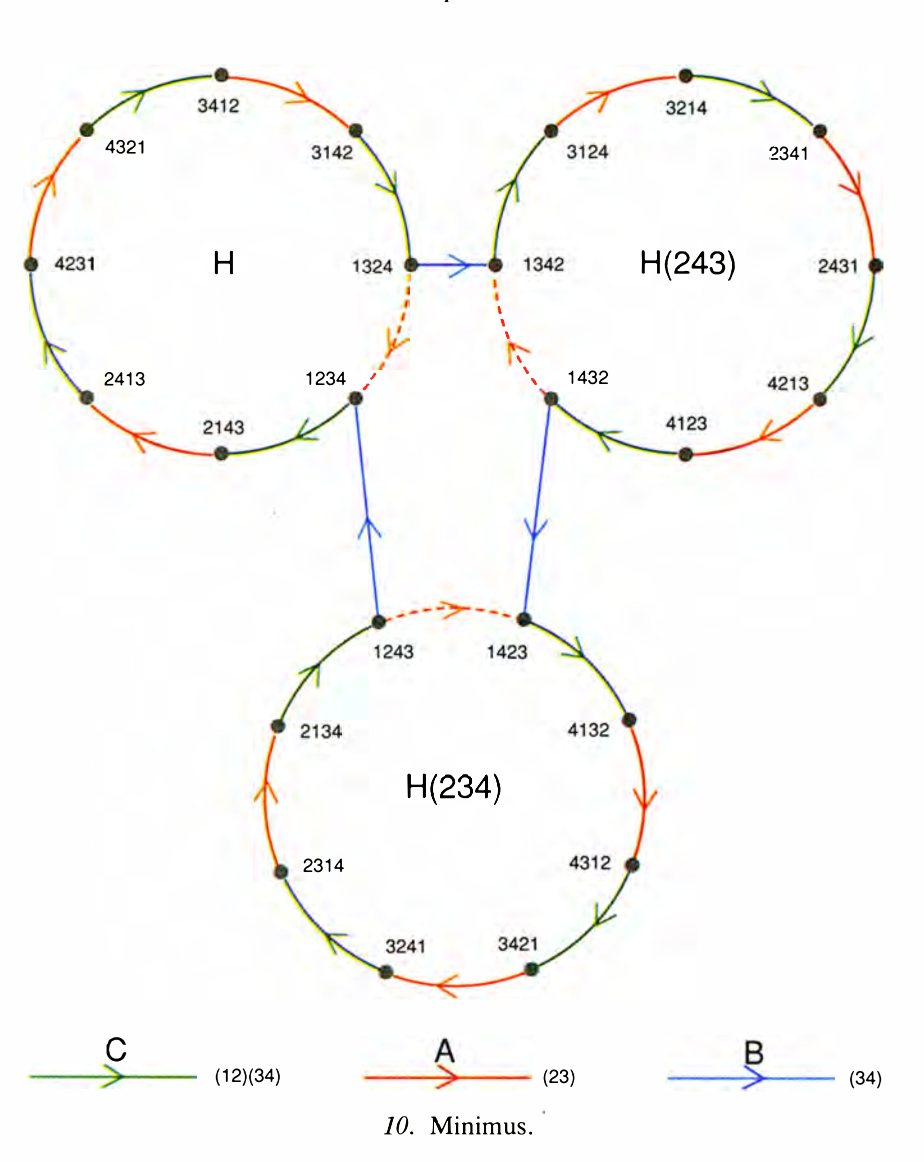
"llevar el tercer símbolo al cuarto lugar,
llevar el cuarto símbolo al quinto lugar,
llevar el quinto símbolo al tercer lugar,
llevar el segundo símbolo al sexto lugar,
llevar el sexto símbolo al segundo lugar".

Toda transformación de S_n puede escribirse así, como producto de ciclos disjuntos; y de hecho, de manera única. Así, la de la figura 6 es igual a (123) (47).

¿Qué transformaciones podemos utilizar para pasar de una variación a otra en los toques de campanas? No es difícil ver que tienen que estar formadas por combinación de ciclos de longitud dos, que intercambian pares *disjuntos* de campanas *adyacentes*. Por ejemplo, para ocho campanas (o



9. Las permutaciones legítimas de un vuelo al siguiente han de intercambiar pares disjuntos de campanas adyacentes; en este caso, (12)(45)(67) con siete campanas.



10. Minimus.

RECUADRO 4 Stedman's Doubles

Se lee por columnas, de arriba abajo y de izquierda a derecha. Las marcas horizontales indican cogrupos. El último cogrupo "se cierra" sobre el comienzo.

Cambio	Movimiento	Cambio	Movimiento	Cambio	Movimiento	Cambio	Movimiento
12345	I						
21354	C						
23145	A						
32415	B	52341	B	31425	B	51342	B
23451	C	53214	A	13452	C	53124	A
24315	A	35241	C	14325	A	35142	C
42351	C	32514	A	41352	C	31524	A
43215	A	23541	C	43125	A	13542	C
34251	C	25314	A	34152	C	15324	A
43521	B	52134	B	43512	B	51234	B
45312	A	25143	C	45321	A	15243	C
54312	D	21534	A	54321	D	12534	A
53421	A	12543	C	53412	A	21543	C
35412	C	15234	A	35421	C	25134	A
34521	A	51243	C	34512	A	52143	C
43251	B	15423	B	43152	B	25413	B
34215	C	14532	A	34125	C	24531	A
32451	A	41523	C	31452	A	42513	C
23415	C	45132	A	13425	C	45231	A
24351	A	54123	C	14352	A	54213	C
42315	C	51432	A	41325	C	52431	A
24135	B	15342	B	14235	B	52431	B
21453	A	51324	C	12453	A	52314	C
12435	C	53142	A	21435	C	53241	A
14253	A	35124	C	24153	A	35214	C
41235	C	31542	A	42135	C	32541	A
42153	A	13524	C	41253	A	23514	C
24513	B	31254	B	14523	B	32154	B
42531	C	32145	A	41532	C	31245	A
45213	A	23154	C	45123	A	13254	C
54231	C	21345	A	54132	C	12345	A
52413	A	12354	C	51423	A		
25431	C	13245	A	15432	C		

más) podemos utilizar (34)(23)(56) o (12)(45)(67), pero no (13) ni (2345) [*véase la figura 9*].

Con esta notación podemos examinar un carillón más complicado, conocido por *minimus*, que se toca con cuatro campanas y que vemos representado gráficamente en la figura 10. En este caso usamos las transformaciones $A = (23)$, $B = (34)$, y $C = (12)(34)$ en una pauta regular.

El diagrama se fragmenta en tres bucles, utilizándose alternativamente A y C a lo largo de cada bucle. El movimiento "irregular" B se utiliza para pasar de un bucle al siguiente.

"¡Oye!", exclamó Quasimódulo. "¡Me he fijado en una cosa! Si nos detenemos justo antes de ese movimiento 'irregular' y examinamos solamente los primeros ocho cambios, las permutaciones que las producen constituyen por derecho propio un grupo más pequeño! ¡Un subgrupo!"

"Tienes razón", dijo Jane. "Llamémoslo el *subgrupo de caza* y denotémoslo H."

"¿Por qué? ¡Ah, ya sé! ¡La obsesión por la caza de la nobleza inglesa!"

"¡No, no! Se dice que una campana 'va de caza' si se mueve regularmente en una dirección, a razón de un puesto por vez. Y, en H, las tres campanas van de caza por turno en ambas direcciones."

El grupo de caza H desempeña un papel crucial en todo el carillón *minimus*. No sólo da los ocho primeros cambios: los ocho cambios *siguientes* corresponden a permutaciones expresables como producto $h(243)$, donde h es una permutación perteneciente al subgrupo de caza H. Este conjunto recibe el nombre de *cogrupo* $H(243)$. Análogamente, los ocho cambios finales se encuentran en el cogrupo $H(234)$, esto es, se obtienen mediante permutaciones de la forma $h(234)$, donde h pertenece a H. Dicho de otro modo, la pauta de *minimus* corresponde a la escisión del grupo completo de 24 permutaciones en tres cogrupos correspondientes al subgrupo H.

En la figura 10 cada bucle de ocho cambios corresponde a un cogrupo.

"¡Quasimódulo, esa ha sido una observación brillante!", exclamó Jane, tras haber calculado todo lo anterior. "Ahora me doy cuenta de cómo obtener por medios teóricos el grupo de *Stedman's Doubles*."

Stedman's Doubles es un método que se utiliza con cinco campanas. Las posibles transformaciones desde un cambio al siguiente son $A = (23)(45)$, $B = (12)(34)$, $C = (12)(45)$, $D = (12)$, $E = (23)$, $F = (34)$ y $G = (45)$. Los campaneros llaman *singles* (solteras) a las cuatro últimas transformaciones, por razones obvias.

Existen $5! = 120$ cambios con cinco campanas. El método comienza aplicando por turno C y A, produciendo un subgrupo que solamente contiene 6 cambios. Los *Stedman's Doubles* escinden el grupo total en 20 cogrupos consistentes cada uno en 6 permutaciones, y se vale de B para encadenarlos en un carillón completo. Tradicionalmente, el método comienza en mitad de un cogrupo, de suerte que la descomposición se efectúa a partir del cambio 32415 en lugar de 12345. El recuadro 4 muestra el resultado.

Existen exactamente dos *singles*, que utilizan ambos el ciclo D. Las permutaciones situadas entre los dos D son las permutaciones pares, que intercambian un número par de parejas de campanas; estas permutaciones constituyen el *grupo alternado* $A5$. Si se suprimen los dos *singles*, solamente es posible tocar la mitad de los cambios. Los *Stedman's Doubles* obedecen a todas las reglas de variación y poseen además una hermosa e intrincada estructura de grupo. Quizás el lector encuentre de su gusto experimentar con una representación gráfica.

"Eso es verdaderamente notable", dijo Jane. "¡Aquellos antiguos campaneros tuvieron que conocer a fondo la teoría de grupos!"

"Verás", dijo Quasimódulo, "el primer trabajo sobre permutaciones digno de mención fue realizado por Joseph-Louis Lagrange en 1770 y por Paolo Ruffini, en 1779. Ambos estaban estudiando la resolución de ecuaciones algebraicas. Los grupos de permutaciones propiamente dichos no fueron inventados hasta 1815, fecha en que Augustin-Louis Cauchy escribió una extensa memoria al respecto. ¿Quién inventó el aire llamado Stedman's Doubles?".

"Fabian Stedman lo explicó en su *Tintinnalogia*."

"¿Y cuándo fue eso?"

"En 1668", dijo Jane.

Empezaban a hacerse amigos.

Libros

Armada Invencible, química cuántica, flecha del tiempo y ciencia bajomedieval

Laureano Carbonell, Armando Riera, Diego Pavón y Luis Alonso

LOS BARCOS ESPAÑOLES DEL SIGLO XVI Y LA GRAN ARMADA DE 1588, por José Luis Casado Soto. Instituto de Historia y Cultura Naval; Editorial San Martín, Madrid, 1988.

Uno de los aspectos peor conocidos de la política naval de España a comienzos de la edad moderna, cuando, por efecto del gran aumento de la extensión territorial del país producida por el descubrimiento de América y que en época de Felipe II, tras la anexión de Portugal, permitía decir con orgullo "que en los dominios de España jamás se pone el Sol", es, sin duda, el elemento fundamental que la hizo posible: el buque. Ante esta realidad y con el propósito de estudiar las naves en sí, surge la obra que nos ocupa, escrita por José Luis Casado Soto. De su historial destacan la publicación de siete libros y más de treinta artículos, así como el ser fundador y director del Museo Marítimo del Cantábrico, miembro correspondiente de la Real Academia de la Historia, presidente del Centro de Estudios Montañeses, director del Laboratorio para Investigaciones Subacuáticas y colaborador del Instituto de Historia y Cultura Naval.

Hasta la aparición de esta obra de Casado Soto se conocían muy mal la capacidad de la construcción naval de los astilleros del país y el detalle de las regiones o puertos donde se concentraban. Tampoco era bien conocido el arqueo o tonelaje de cada unidad, debido a la poca profundidad con que se habían estudiado los métodos y unidades de arqueo utilizados.

Al analizar la política naval española del siglo XVI Casado Soto nos recuerda que es preciso tener en cuenta un hecho crucial: España estaba implicada en dos ámbitos marítimos bien distintos. De una parte estaba el Mediterráneo, donde la nave de guerra por excelencia seguía siendo la galera, la nave longa de la más remota antigüedad, cuya evolución había ido adecuándola a las necesidades de cada momento. El otro ámbito era el Atlántico, también de notable tradición, aunque en el orden de importancia estuvo muy por debajo del Mediterráneo hasta el siglo XVI, en que alcanzó la preponderancia que mantiene aún hoy. Ese mismo siglo significó la desaparición de la galera del Cantábrico. A partir de entonces también, la costa del norte de la península ibérica se encargó de proporcionar el 80 o 90 % de las naves que iban de Sevilla a Cádiz al Nuevo Mundo, por ser la construcción naval de aquella parte más adecuada a las exigencias de la navegación oceánica. Con el tiempo ese porcentaje experimentó un brusco descenso, hasta quedar reducido a un 50 % en 1580 y bajar aún más en el año 1610.

Uno de los mayores problemas permanentes de la navegación con América fue la piratería. Sufrida ya desde el primer momento, su incidencia condujo a la promulgación de una Real Cédula en 1505, estableciendo el armamento de fustas para proteger el estrecho de Gibraltar de los corsarios moros. Dos años más tarde, Juan de la Cosa se ocupó, con cargo a la Casa de Contratación, de la puesta en servicio de dos carabelas para proteger de los corsarios nórdicos las naves procedentes de Indias. Más adelante se crearon armadas de vigilancia dedicadas a patrullar por las costas españolas del mar de Poniente, desde el estrecho de Gibraltar a Fuenterrabía. En 1549, se impuso la alternativa de organizar la navegación a Indias con flotas, debidamente escoltadas, estableciéndose doce años después la frecuencia de dos viajes anuales. El sistema no constituía ninguna novedad. Existía el precedente de la flota de siete naves que hacía un viaje anual a Flandes, según había dispuesto el Consulado de Burgos en 1513. Luego, en 1575, el aparato defensivo se incrementó con la construcción de galeras para proteger las flotas en el Caribe, lo que daría origen a la Armada de Barlovento.

Dedica un capítulo a estudiar algunos aspectos de la construcción naval de la época. Empieza por aclarar las diferencias existentes entre los diversos sistemas de arqueo utilizados. Destaca también el error tan común de considerar el tonel o la tonelada como unidades de desplazamiento, cuando en realidad eran de arqueo o volumen de carga útil de la nave, la única magnitud susceptible de poder ser calculada con cierto rigor. También compara las unidades de medida de distintos lugares y los valores del tonel dados por los autores contemporáneos, sin olvidar los efectos de la imposición del codo real o de ribera para el arqueo de naves por Felipe II, en 1590. Explica también la diferencia entre el tonel macho o del Cantábrico y el tonel andaluz, con su incidencia en el valor de la tonelada de carga, inicialmente igual al tonel y que luego, al ser aumentada en un 20 %, se convirtió en unidad de cuenta, con la denominación de tonelada de sueldo.

Analiza y compara las diversas fórmulas de arqueo utilizadas en los siglos XVI y XVII, para seguir con un intento de aproximación al tonelaje de la flota española del siglo XVI, basándose en los inventarios de buques de diversos puertos cántabros en un momento dado y determinando el tonelaje medio de cada unidad. Otro aspecto que destaca es la preocupación de la corona por los bosques, que llegó a promulgar medidas sobre repoblación forestal, para no agotar la madera de construcción naval, actividad en pleno auge por la necesidad de reponer las naves perdidas y satisfacer las exigencias cada vez mayores del comercio indiano. Sobre este particular el autor destaca que, a la larga, la navegación no proporciona beneficios a los armadores, pues las ganacias no bastaban para enjugar los déficits producidos por los embargos frecuentes de las naves para formar armadas. Esto le da pie a estudiar las naves en sí, compuestas en gran parte por mercantes a sueldo o embargados y más concretamente por naos, navíos, galeones, galeones agalerados, galeazas, zabras, pinazas y chalupas.

Finaliza la obra con un extenso capítulo dedicado a la Gran Armada de 1588, que, como es sabido, jamás se designó oficialmente con el nombre de Armada Invencible. Como precedente de su creación cita el plan de asalto a Inglaterra propuesto por Alvaro de Bazán a Felipe II en 1583 y la petición que le formuló el propio rey en ese sentido en 1586, a raíz del ataque de Drake a Vigo y del desembargo de tropas inglesas en Holanda. Luego detalla los preparativos de la flota en Lisboa, así como las causas que hicieron retrasar su salida, incluyendo la incidencia de las epidemias, que obligaron a desembarcar a más

de mil tripulantes, la circunstancia de haberse descompuesto las vituallas, la demora producida por el fallecimiento de Alvaro de Bazán, marqués de Santa Cruz, y la tardanza en llegar del duque de Medina Sidonia. Finalmente la partida de Lisboa tuvo lugar el 28 de mayo. La integraban 127 naves y diez carabelas que transportaban aguada y víveres. Algunas fuentes hablan también de siete falúas.

Sobre la flota en sí el autor analiza profundamente la composición de las escuadras, la dotación de marineros y soldados a bordo, y su proporción con respecto a las toneladas de sueldo, lo que le permite hacer la oportuna evaluación utilizando el criterio algo posterior de considerar una nave bien tripulada cuando llevaba 15 hombres de mar por cada cien toneladas. Esto permite justificar la disciplina existente a bordo de las unidades de la Gran Armada, lo que se traducía en una excelente ejecución de las maniobras y en la asignación de mucho espacio a los soldados.

En lo concerniente a las naves que componían la flota de la Gran Armada y debido a la falta de planos y de dibujos contemporáneos, así como a la circunstancia de ser las pinturas representativas existentes muy conocidas y todas ellas posteriores y tratadas con gran licencia por parte de los autores, Casado Soto se dedica a analizar los inventarios y las actas de arqueo. Con ellos confecciona diversos cuadros comparativos de las proporciones y características de los galeones, galeones agalerados, galeoncetes, galizabras y de los mercantes armados, entre los que figuran urcas y naves auxiliares, como pataches, zabras, pinazas y carabelas, tanto cántabros como del Mediterráneo e incluyendo las unidades procedentes del Adriático, aportadas por Venecia y Ragusa. Hay también un cuadro comparativo de las unidades utilizadas por España e Inglaterra en 1588 y el detalle de las dimensiones de 30 naves inglesas.

Analiza las naves que llegaron a España, en cuyo cómputo Casado Soto admite la diferencia de dos urcas, las cuales, al no figurar en ninguna relación, supone que se dispersaron y llegaron a Lisboa, así como otras tres embarcaciones auxiliares que da por perdidas. Así llega a la conclusión de haberse perdido 35 naves, frente a las 63 indicadas por Cesáreo Fernández Duro y las comprendidas entre 59 y 64 que dan algunos autores extranjeros. Señala también que curiosamente las pérdidas de naves por combate fueron muy pocas y la mayoría de las que se perdieron a causa del temporal fueron nórdicas e italianas tomadas a sueldo. Concluye el capítulo con la demostración de que la falta de éxito de la Gran Armada de 1588 no significó en absoluto el ocaso de la Marina Española. Antes de un plazo de dos años todas las pérdidas ocasionadas por aquella acción quedaron compensadas con la puesta en servicio de 21 nuevos galeones grandes. Mientras tanto, las flotas de Indias no cesaron de llegar con regularidad a la península, pese a los intentos de los ingleses y de sus aliados por apoderarse de ellas durante toda la guerra, que se prolongó hasta el año 1604.

Como colofón de la obra figuran unos extensos apéndices documental y bibliográfico, de gran valor para justificar los datos fundamentales en que el autor se apoya. (L. C.)

SECOND QUANTIZED APPROACH TO QUANTUM CHEMISTRY, por Josep Peter R. Surján. Springer Verlag; Berlín, 1989.

Sorprende hasta qué punto ciertos aspectos de la química cuántica gozan de una lozana madurez. En 1966 H. C. Longuet-Higgins introdujo en esta disciplina las nociones básicas de segunda cuantificación –también llamada cuantización, técnica desarrollada en los primeros años de la mecánica cuántica por Heisenberg, Jordan y Dirac. Y parece que dicho formalismo no ha calado muy hondo en química, ya que el espíritu del libro de Surján sigue siendo el mismo que el del artículo, mucho más escueto, de aquel autor: en vez de una presentación de la química cuántica arropada en el lenguaje de segunda cuantificación, es una introducción a este formalismo para teóricos no familiarizados con el mismo. Con ello se pierde la ventaja que supondría un enfoque más interdisciplinar, que rompiese el aislamiento en que se encuentra la química cuántica con respecto a otras áreas de la física. En esta dirección, por ejemplo, apuntan los capítulos 16 y 17 del libro, que introducen las cuasipartículas, los hamiltonianos de espín y las álgebras de Lie. Estos temas saben a poco. Otra cuestión, evidentemente, es si una perspectiva más amplia produciría un éxito de ventas...

Pasando del enfoque general a la crítica del contenido, el texto cumple escrupulosamente su cometido de libro de introducción y referencia, y de desmitificación de arcanos. No requiere una preparación matemática especial; exige sólo conocimientos elementales de mecánica y química cuántica. La segunda cuantificación es un formalismo muy elegante que transfiere la propiedad de antisimetrización de las funciones de onda electrónicas a ciertas propiedades de operadores. Por ello, se presta a la claridad de la exposición, cualidad que, es innegable, el autor ha conseguido. Las definiciones y propiedades básicas de los operadores y representaciones, el estado vacío y (sobre todo) el vacío de Fermi están expuestos para ser entendidos en la primera lectura y para ser recordados en una consulta rápida. Para adquirir agilidad en la manipulación de los conceptos, algunos capítulos contienen una (corta) serie de problemas. Un reflejo de las cualidades didácticas del autor es la claridad y el detalle con el que éstos se resuelven en el último capítulo del libro.

El texto intercala el formalismo general con aplicaciones a métodos específicos. En este sentido, el lenguaje de números de ocupación privilegia modelos como el de Hartree y Fock que, en su versión de campo autocoherente (desarrollo en una base), proporciona un conjunto de orbitales ocupados y virtuales que pueden tomarse como base ortonormal de partida. Con la ayuda de los conceptos de vacío de Fermi y nuevos operadores de creación y aniquilación, se introducen temas fundamentales en aquel modelo, como el teorema de Brillouin y la teoría de perturbaciones de muchos cuerpos. De hecho, el capítulo 12, dedicado a esta teoría, podría ser mucho más extenso, a expensas quizá de las numerosas citas a modelos semiempíricos y de orbitales π. Una muestra de esta excesiva concisión puede verse en el pie de la página 93 sobre propiedades extensivas, tema que merecería un tratamiento más detallado. Del mismo modo, con la adición de un capítulo (al menos) sobre métodos diagramáticos, el libro hubiera tenido la virtud de condensar, y desmitificar, dos lenguajes y técnicas minoritariamente utilizadas por los químicos cuánticos en un solo texto de introducción y referencia. En cambio, el autor ha elegido explicar la generalización del formalismo al caso de bases no ortogonales. No encuentro muy convincente la utilidad práctica de la solución recomendada (uso de conjuntos biortogonales o del espacio recíproco).

El autor termina su prólogo con la afirmación contundente de que la segunda cuantificación es el enfoque más sencillo al problema de muchos electrones. Con otras palabras esta afirmación se repite en la contraportada. Cabe entonces preguntarse por qué, habiendo sido desarrollada la teoría en 1931, e introducida en la química en 1966, no constituye aún el lenguaje mayoritario de la química

cuántica moderna, sustituyendo al de funciones de onda y álgebra matricial. Desde luego, Surján deja claro que no es una cuestión de dificultad técnica. Una posible causa es que el formalismo se presente a menudo junto al de operadores de Green en una mezcla algo indigesta, si sólo quieren estudiarse estados ligados. Otra, que el tratamiento que se le da en libros modernos sea superficial. Pero también podría deberse a posibles inconvenientes que el autor, llevado por su entusiasmo, olvida mencionar. Precisamente la elegancia del formalismo, y su énfasis en el álgebra de operadores, pueden no ser idóneos para una introducción didáctica de las fuerzas que aparecen al acercarse dos átomos y formar un enlace químico. A menudo, ésta se consigue mejor con ayuda del modelo de enlace de valencia, que se adapta con dificultad al lenguaje de segunda cuantificación. También el álgebra puede encubrir deficiencias del modelo de promoción en que está basada: por ejemplo, las características no físicas de los orbitales virtuales, que son tratados en pie de igualdad con los ocupados en el espacio de números de ocupación. Finalmente, es sorprendente (¿significativo?) que el libro de Surján dé un solo ejemplo en el que la segunda cuantificación contribuye a la comprensión de la física de un problema (capítulo 15).

En resumen, se trata de un texto conciso y claro al que acudir para refrescar la memoria sobre el lenguaje de segunda cuantificación, sin tener que recordar lo que son los operadores de Green y propagadores, ni sin tratar antes el caso bosónico. ¿Es optimista con respecto a las ventajas del formalismo? Para decidirlo, esperemos a que alguien escriba un libro de introducción a la química cuántica basado en el mismo. (A. R.)

THE PHYSICAL BASIS OF THE DIRECTION OF TIME, por E. D. Zeh. Springer Verlag; Heidelberg, 1989.

Es bien sabido que las leyes dinámicas de la naturaleza, por ejemplo, las leyes de Newton o la ecuación de Schrödinger, son invariantes bajo inversión temporal; es decir, éstas no sufren cambio alguno si en ellas sustituimos t por $-t$. Por contra, los procesos naturales no gozan de esa invariancia; evolucionan siempre en un sentido y nunca en el opuesto. Así, un cuerpo caliente puesto en contacto con otro frío perderá calor en favor del segundo hasta que ambas temperaturas se igualen. No se produce el proceso inverso. Nadie espera que dados dos cuerpos en contacto a igual temperatura, uno se enfríe espontáneamente al tiempo que el otro se calienta. Esta asimetría, respetuosa del principio de conservación de la energía, marca una dirección (una flecha) en el tiempo; si nos dieran las lecturas de esas temperaturas en dos instantes distintos sabríamos inmediatamente qué lectura se efectuó antes y cuál después.

Este ejemplo ilustra la flecha termodinámica. Intrínsecamente unida a ella se encuentra la parte del segundo principio de la termodinámica según la cual la entropía de un sistema aislado no puede disminuir.

Existen otras flechas del tiempo: la electromagnética (o de la radiación), que excluye los potenciales electromagnéticos avanzados y sólo acepta los retardados, de forma que las señales electromagnéticas no se reciben sino después de emitidas; la evolutiva, ligada a la creciente organización de la materia, tal como puede observarse en la evolución biológica y social; la microscópica –o si se prefiere cuántica– relacionada con la desintegración de los kaones neutros (una variedad de mesones extraños). Dicha desintegración viola la inversión temporal. La cosmológica, que elige la dirección del tiempo en que el uni-

verso se expande. La psicológica, reconocida en la capacidad de poder recordar el pasado, pero no el futuro. La gravitacional, relacionada con la creciente acumulación de materia debido a que la fuerza gravitatoria es siempre atractiva, nunca repulsiva.

A pesar de que todas ellas apuntan en el mismo sentido, no existe, a primera vista, una conexión o dependencia de unas con otras. Ni mucho menos está claro cuál pueda destacarse como primordial (o fundamental) en el sentido de que las demás deriven de ella.

Pues bien, investigar esas posibles relaciones y dilucidar cuál sea la flecha primordial constituye el objetivo del libro. La empresa resulta notable, pues no sólo se requieren conocimientos profundos de todas las ramas de la física teórica, sino que los argumentos que suelen aducirse están llenos de sutileza. El autor aborda la tarea no sin preparación. Por una parte, su preocupación por este tema cuasi-filosófico viene de antiguo; sus primeras publicaciones se remontan a veinte años atrás. Por otra parte, esta obra es fruto de una serie de cursos impartidos en la Universidad de Heidelberg, el último de 1986, así como de un texto anterior (*Die Physik der Zeitrichtung*), ampliamente revisado.

Consta de seis capítulos acompañados de una introducción y un epílogo. El primero, brevísimo, condensa el concepto de tiempo del autor. Los siguientes se centran en el examen de las distintas flechas (salvo la psicológica). En el segundo, dedicado a la flecha electromagnética, casi nada de lo expuesto resulta nuevo. El siguiente se ocupa con profundidad de la flecha termodinámica, llegando a tratar el formalismo de Zwanzig de ecuaciones maestras. En él se hace resaltar la dependencia de las mediciones macroscópicas con respecto del experimentador; algo que podría entrar en conflicto con el carácter objetivo de la termodinámica. El cuarto versa sobre la flecha cuántica, centrándose en el colapso de la función de onda; un concepto que se mostrará clave a la hora de decidir cuál flecha sea la fundamental. Merece destacarse en este capítulo el estudio de la flecha del tiempo en la formulación de Everett de la mecánica cuántica. En el siguiente trata de la flecha cosmológica y explora la conexión entre gravitación y termodinámica. Para ello toma como paradigma el comportamiento de los agujeros negros. El último capítulo, en el que se combinan resultados de los capítulos precedentes, versa sobre la cuantización del tiempo. Acudiendo a la ecuación de Wheeler-De Witt, avanza la opinión de que la flecha fundamental es la dada por la expansión del cosmos –un punto de vista con el que muchos discreparán– y que la raíz común a todas ellas reside en la estructura de la función de onda del universo.

Esta obra merece elogio desde distintos ángulos. Estamos ante un atrevido compendio de un tema altamente especulativo, en la misma linde con la filosofía, y de profundas implicaciones en las distintas ramas de la física. El autor realiza un esfuerzo unificador. Abundan visiones intuitivas y profundas de las que la física está tan necesitada; por ejemplo, la conexión entre las singularidades desnudas y las soluciones no ergódicas de la mecánica (capítulo 5), o el papel del principio de Mach en la física cuántica (capítulo 6).

En el apartado del "debe" hemos de indicar una escasa claridad de exposición, no proveniente de lo avanzado del tema, sino, a lo que me parece, de una falta de esfuerzo en aras de la misma; por ejemplo, a la hora de expresar el teorema de "no hair" (capítulo 5). Creo que hubiera merecido la pena una elaboración más detallada del conjunto de la obra, aunque ello implicara extender el texto de 166 páginas a 200 o 250. Se omiten algunas referencias clásicas; en concreto: "The arrow of time" de David Layzer publicado en *Astrophysical Journal* y *The enigma of time* dirigido por Peter Landsberg (Adam Hilger). Además, pasa por alto un resultado de notable interés debido a Bob Wald, quien demuestra que, cuando un fuerte campo gravitatorio actúa sobre un sistema cuántico, surge, de forma natural, una flecha del tiempo. Esto hizo sugerir a Wald que un ingrediente básico de cualquier teoría que trate de compaginar gravitación con mecánica cuántica ha de ser, precisamente, una flecha del tiempo. Asimismo, ni siquiera se menciona el conocido resultado de W. H. Bonnor (*Physics Letters A*, 1987), quien estudia el colapso de una esfera de fluido capaz de emitir radiación. (Para éste, la flecha gravitatoria propuesta por Penrose apunta en la dirección opuesta a la flecha electromagnética.)

Habría sido deseable un capítulo final –desde luego breve– de recapitulación en el que se resumiesen las principales conclusiones junto con las líneas generales que a ellas dan lugar.

El libro está dirigido –en palabras del autor– "al estudiante o científico interesado en una visión global del problema (de la flecha del tiempo) y que desea considerar su campo específico de investigación en relación a los otros". Asimismo, el autor confía en que pueda servir al filósofo familiarizado con la física teórica.

No obstante, tengo mis dudas de que llegue a convertirse en un "clásico". Por dos razones. La primera, la falta de claridad ya apuntada. La segunda nada tiene que ver con el texto en sí, sino con el rápido desarrollo de la parcela de la física teórica orientada a unificar todas las interacciones y –a partir de ahí– extraer las consecuencias cosmológicas (por ejemplo, teoría de supercuerdas). Ello quizá haya empujado al autor a escribir esta obra antes de que pase más tiempo. (D. P.)

MEDIEVAL AND EARLY RENAISSANCE MEDICINE. AN INTRODUCTION TO KNOWLEDGE AND PRACTICE, por Nancy G. Siraisi. The University of Chicago Press; Chicago, 1990. **AVICENNA IN RENAISSANCE ITALY. THE CANON AND MEDICAL TEACHING IN ITALIAN UNIVERSITIES AFTER 1550**. Princeton University Press; Princeton, 1987.

Si a esos dos libros de Nancy G. Siraisi, profesora de historia de la Universidad Municipal de Nueva York, le añadimos un tercero suyo (*Tadeo Alderotti and His Pupils*) y los tres compendios de artículos de su maestro Carl B. Schmitt publicados en "Variorum Reprints" (Londres, 1981, 1984 y 1989), tendrá el lector documentación suficiente para introducirse con firmeza en la ciencia bajomedieval y renacentista; la bibliografía y las notas le llevarán, si quiere profundizar, a los especialistas de distintos sectores. Pero el marco general lo tendrá ya adquirido.

Tal vez debiéramos matizar que nos referimos a las ciencias biomédicas. Y otra astilla: la línea de investigación que representa Siraisi tiende con excesiva celeridad a subsumir lo biológico en lo médico. Se da por supuesto que, a diferencia de la situación actual en que la medicina bebe sus conocimientos en las fuentes de información bioquímica o citológica, no había entonces más biología que la recogida en los libros de medicina, única ciencia con estatuto de tal.

¿En qué línea de investigación milita Siraisi? Una corriente que desacartona el saber y lo vivifica en la sociedad de su tiempo. En el primer libro, que cubre la práctica y la enseñanza de la medicina desde el siglo XII hasta finales del XV, la autora incardina lo que pudiera ser un elenco de "sectas", instituciones, traducciones, textos de docencia o rosario de tesis anatómicas, fisiológicas, patológicas,

quirúrgicas o terapéuticas, en el desenvolvimiento diario de la sociedad en todas sus formas y clases.

Preocupa a esa corriente la fijación del texto. Por eso encontramos una falange de eruditos afanados en la colación y depuración de los manuscritos de las principales autoridades (Arnau, Apiano, Tadeo, Gentile), cuyo resultado final son las muy provechosas ediciones críticas, realizadas o en curso.

Preocupa a esa corriente también la situación de los profesionales, con todas las cuestiones concernientes a su desempeño. Distintas categorías y su jerarquización: médico con formación académica, experto o sanador sin ella, barbero, cirujano, partera, etcétera. Cuánto ganaba cada uno y necesidad de trabajar, al propio tiempo, en otros oficios más lucrativos. (Semejante "pluriempleo" era rasgo característico no sólo de la medicina, sino, sobre todo, de la enseñanza. En nuestro país, todavía en el siglo XVIII los maestros de escuela solían ser sacristanes o boticarios.) Estos estudios sociales levantan el mapa sanitario de una zona en un tiempo determinado, identifican el número de médicos por mil habitantes y su origen, escalonan la estratificación de la atención sanitaria (de pago, de beneficiencia) y acotan las minorías étnicas (moriscos o médicos hebreos para las juderías). Las fuentes de información o rastreo se buscan en archivos parroquiales o municipales, en asientos contables, en protocolos notariales.

La enseñanza y la transmisión del saber constituyen otro capítulo de interés para los historiadores de esa línea que pretendemos definir, que, en la vertiente práctica, describe con minuciosidad el desarrollo del acto médico. Importa averiguar cómo se convirtió el centro de sanidad de Salerno en centro de docencia; luego, de traducción. ¿Quiénes eran los *magistri*? Desde el sur de Italia rastrean el impulso institucional que vertebra a Europa entera, con Montpellier y Bolonia como sedes pioneras o fundadoras. A modo de banderolas señalan las nacientes facultades, con sus profesores, procedencia y extracción social de sus alumnos, las líneas generales de sus enseñanzas, los estipendios y las figuras de prestigio. Añaden, por supuesto, los planes de estudio, la relación profesor-alumno, clases teóricas-clases prácticas, etcétera. A este género histórico pertenece el *Avicena* de Siraisi, donde, tras detallar el contenido del *Canon*, expone cómo se desmenuzaba su glosa en los cursos universitarios y los retazos de su aplicación en los distintos segmentos del *ars medendi*.

Cuando esa escuela historiográfica aborda la anatomía y la fisiología, insiste en dejar claros los inicios de la disección de cadáveres (finales del siglo XIII) y su importancia en el mejor conocimiento del cuerpo humano. Diríase que, para ellos, la disección en el XIII viene a equivaler a la introducción del nuevo Aristóteles en las postrimerías del XII. Una incorporación que servirá para dividir a los "filósofos" de los "médicos" en lo concerniente a la función del cerebro o al papel del hombre y de la mujer en la fecundación. No parecen dispuestos, los historiadores de este credo, a ir muy lejos en la profundización de la teoría fisiológica de los humores, y suelen atenerse a un resumen del *Canon*, sino de la *Articella* (un compendio de extractos o apuntes para la praxis médica). Vemos ejemplificado ese modo de proceder en el capítulo 4 del primer libro de reseña y el octavo de la obra sobre *Avicena*.

La enfermedad y el remedio, en este enfoque, pierden lejanía académica de síntomas y síndromes para involucrarse en las epidemias reales y en las medidas tomadas tal año en cual ciudad. No es de extrañar, pues, que busquen información en las hagiografías, en las famosas *vitae fratrum*, donde se describe con toda suerte de detalle el cuadro morboso, la evolución, la incapacidad de los remedios conocidos y el recurso al poder taumatúrgico del santo. Esa cotidianidad de vida, sin embargo, no está reñida con la explicación racional de los distintos grados de la disfunción humoral y de la correspondiente proporcionalidad de los medios terapéuticos. Como tampoco se olvidan de la naturaleza y formas del método más socorrido de cura: los evacuantes (la flebotomía como evacuante universal y las ventosas, escarificaciones, sanguijuelas y cauterios como evacuantes particulares). Complemento de esto es la cirugía, en la que consideran su evolución paulatina, de arte a ciencia académica, su progreso en tiempo de guerra y el refinamiento de su armamentario.

Siraisi sobresale, además, por su especial habilidad para ensartar el relato, idea tras idea, capítulo tras capítulo, en torno a un grabado contemporáneo, que ratifica *de visu* su clara exposición.

Esa manera de historiar merece, en mi opinión, una salvedad. La insinué al comienzo: la biología no sólo no debe subsumirse en la medicina, sino que los principios de ésta no pueden entenderse sin una remisión a los fundamentos en que se basa aquélla. Siraisi conoce la disputa sobre la distinción entre medicina como ciencia y medicina como arte, así como la jerarquización de los niveles de saber (la recoge en parte en las páginas 236-238 del libro sobre *Avicena*). El reduccionismo teórico no es ninguna novedad de la filosofía analítica: para los medievales, una ciencia era subordinada de otra cuando los principios de la inferior podían explicarse por los principios de la superior. Pues bien, existe todo un conjunto de ideas biológicas por ahondar y articular que constituyen el respaldo o fundamentación de las doctrinas fisiológicas. Alguna aproximación se ha realizado en el estudio del concepto cardinal de humedad, en particular del *humidum radicale*, que es la definición de vida. Nadie, que se me alcance, ha logrado sistematizarla en los múltiples sentidos que lo "humidum" recibe en la Edad Media.

Se entendería mucho mejor la anatomía, la fisiología y, sobre todo, la *materia medica*, es decir, el conjunto de plantas, animales y minerales dotados de propiedades terapéuticas, si tuviéramos un marco de filosofía natural previo. Siraisi se apresta a remediarlo con algunas páginas en el primer libro —la consabida referencia a humores y cualidades— y con un centenar largo en el volumen sobre *Avicena*. Pero en éste no se decide a afrontar la cuestión en puridad y prefiere deleitar al lector con una suerte de ensayos sobre autores que toman a *Avicena* por pretexto para derrollar sus propias teorías. ¿Cómo resolver esa cuestión? Lisa y llanamente, estudiando el contenido de los textos, para descifrar qué es la vida, el organismo, las partes componentes, relación entre partes, relación con el medio, desarrollo, etcétera. Dominando los medios heurísticos de que se valían: la materia, la forma, las potencias (conceptos que deben rescatarse de una interpretación escolástica amojamada). En una palabra, aplicar el bisturí al texto. Por evitar una historia libresca, se abortó la práctica del comentario. ¿Qué ha quedado? En buena parte, y paradójicamente, una interpretación libresca de la biología medieval, que la confina a mero apéndice de la medicina.

Dejando aparte ese excursus sobre el lugar de la medicina en las ciencias medievales, conviene que el lector sepa que se encuentra ante dos obras de extraordinaria factura; la primera se confiesa modestamente una introducción para no especialistas; la segunda es un trabajo de investigación sobre el desarrollo del avicenismo en las universidades italianas. Si, en el primer libro, la tersura de la exposi-

ción arrastra al lector, en el segundo le gana la solidez de la documentación y el rigor de las hipótesis extraídas. (L. A.)

THE ALCHEMICAL CORPUS ATTRIBUTED TO RAYMOND LULL, por Michela Pereira. The Warburg Institute. University of London, 1989. JOHANNES' DE RUPESCISSA "LIBER DE CONSIDERATIONE QUINTAE ESSENTIAE OMNIUM RERUM": DEUTSCH, por Udo Benzenhöfer. Franz Steiner Verlag Wiesbaden GmbH; Stuttgart, 1989.

Estos dos libros complementan los dos anteriores de Siraisi. O los de Siraisi complementan estos dos, según se vea. Cuenta A. G. Debus que abandonó su carrera de investigador químico para dedicarse a historiar su disciplina cuando advirtió la postergación de la alquimia en el ámbito de los estudios de la revolución científica y su depreciada consideración entre las pseudociencias. La verdad es que todo lo que rodea a la alquimia está tildado de "pseudo": supuesta es su naturaleza científica, supuestos los nombres de la mayoría de sus cultivadores, supuestos sus logros.

Aunque parezca mentira, no existen, a estas alturas, estudios serios sobre las obras principales del cosmos alquímico. Ni siquiera disponemos de un ensayo aproximativo del desarrollo de la ciencia de la destilación en el noreste peninsular, cuna y vivero —incluso en lengua vernácula— de una extraordinaria producción. Fuera de los trabajos de los Carreras-Artau, amén de leves insinuaciones del maestro Diago, ceñidos a la filosofía oficial, nadie ha osado hincarle el diente a una presumible eclosión científica sin parangón en la vieja marca hispánica.

Ni siquiera parecen haberse sentido tentados quienes se dedican a Arnau de Vilanova y la medicina de Montpellier en esos mismos siglos, quizá más preocupados por apuntalar la introducción de Hipócrates y del nuevo Galeno en los estudios y en la praxis. Y ocurre, en definitiva, que nos movemos en la paradoja de poseer el mayor filón químico de la baja Edad Media sin nadie que sepa beneficiarlo. Cuantos hasta ahora se han asomado han permanecido a extramuros: carácter esotérico de las prácticas, hispanidad o no de Rupescissa-Peratallada y otras atenciones de idéntico tono menor.

La situación, en breve, es la siguiente: la corriente alquimista, aunque dice hundir sus raíces, a través de los árabes, en el mundo helénico, órfico en última instancia, con una línea colateral que procedería de oriente, la verdad es que el impulso principal se registra en el siglo XIV. Desde el segundo tercio de esa centuria hasta Paracelso menudan manuscritos amparados bajo el nombre de grandes figuras, las que se suponía habían creado la tradición alquímica; los más recientes: Alberto, Bacon y Lull. El mallorquín, en particular, vio aureolada su figura con conversiones tumbativas, viajes espectaculares y poderes preternaturales; dio nombre a tal floresta de manuscritos, que no había manera de acotar el núcleo central, es decir, la semilla de donde parten los escritos principales y sobre la que operan afeites y añadidos.

Michela Pereira pretende justamente poner orden. Lo hace desde el punto de vista histórico-filológico, tan caro a Schmitt, a quien va dedicada la obra. Colaciona manuscritos, engarza unos con otros, examina con lupa colofón tras colofón, somete a criba posturas disidentes (los Carreras y padre Batllori, por ejemplo) hasta concluir con un grupo provisional de obras asignables al corpus pseudo-lulliano.

Filólogo es también Benzenhöfer, quien nos trae la edición crítica del manuscrito alemán del *Libro sobre la consideración de la quintaesencia de todas las cosas*, del franciscano Juan de Rupescissa. Si algún tema representa la alquimia, ése es el de la quintaesencia; si algún libro constituye el catecismo del misterio de la transmutación de los minerales, es éste.

Pereira ha realizado un trabajo ímprobo, dureza que se refleja incluso en la redacción del texto. Benzenhöfer lo ha tenido más fácil con su tesis doctoral, encarrilada de acuerdo con los cánones: vida y obra, comparación de los manuscritos y de las ediciones impresas, relación del libro con el corpus lulliano, influjo en las obras sobre el arte de la destilación y la alquimia médica (paracelsismo), bibliografía. El glosario de términos alquímicos inicia un camino a seguir: el de establecer las equivalencias contemporáneas entre el lenguaje hermético y la referencia real.

Con estas dos obras empezamos a conocer mejor el marco de la ciencia bajomedieval e inmediatamente anterior a la revolución científica. La búsqueda de la quintaesencia no se limitaba a un *quid* único. Cada cosa tenía la suya propia, más o menos ligada a la humedad radical; y en eso engarza, o debería hacerlo, con el estudio de la biología. La alquimia no era un arte sistemático, sino amasijo de múltiples tanteos de rebotica, carente de una teoría que superara el galenismo oficial. ¿O había más? (L. A.).

Indice anual

Este índice contiene los nombres de los autores y los títulos de los artículos aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 1990. Se incorpora, asimismo, la relación alfabética de las secciones* Juegos matemáticos, Juegos de ordenador y Taller y laboratorio.

AUTORES

TITULOS

JUEGOS MATEMATICOS

Ian Stewart

JUEGOS DE ORDENADOR

A. K. Dewdney

TALLER Y LABORATORIO

Jearl Walker